

Analyse eines neuentwickelten Windsichters zur Klassierung von Gesteinskörnungen

Dissertation

zur Erlangung des Akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

vorgelegt von
Constantin Weigel
aus Flensburg

genehmigt von der Fakultät für Energie und Wirtschaftswissenschaften der
Technischen Universität Clausthal

Termin der mündlichen Prüfung:
19.02.2021

Dekan: Prof. Dr. rer. nat. habil. B. Lehmann

Vorsitzender der Promotionskommission: Prof. Dr. Hans-Jürgen Gursky

Betreuer: Univ.- Prof. Dr.-Ing. habil. H. Tudeschi

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Albert Daniels

Zusammenfassung

Gesteinskörnungen sind ein wichtiger Baurohstoff, der seine Anwendung in Baustoffen wie Asphalt findet. Bei der Gewinnung und Verarbeitung der Gesteinskörnungen werden zwischen 10 Gew.-% und 20 Gew.-% der Feinkörnungen zu Gesteinsfüller, d. h. auf Korngrößen unter 63 μm , zerkleinert [1]. Der Gesteinsfülleranteil beeinflusst die mechanischen Eigenschaften des Asphalts, indem sie das Bitumen binden. Ein zu hoher Füllstoffgehalt führt zu überhartem, sprödem Asphalt, während ein zu niedriger Füllstoffgehalt zu weichem Asphalt führt, der durch Belastungen verformt werden kann [2] [3]. Um die geforderten mechanischen Eigenschaften des Asphalts zu gewährleisten, ist ein Füllergehalt zwischen 5 Gew.-% und 10 Gew.-% gefordert [4].

Zur Reduzierung des Gesteinsfülleranteils werden verschiedene Klassierverfahren eingesetzt. Gerade viele ältere Aufbereitungsanlagen verfügen heutzutage nicht mehr über die nötigen Kapazitäten um ihre gesamte Produktion zu klassieren. Gesteinskörnungen, welche einen zu hohen Fülleranteil aufweisen, lassen sich allerdings kaum dem Markt zuführen und werden deshalb auf Halden deponiert. Zur Aufbereitung dieser Rohstoffe bedarf es ein niedrigbauendes Verfahren, welches in laufende Förder- und Aufbereitungsprozesse integriert werden kann und sich so zur Nachrüstung bestehender Aufbereitungsanlagen eignet.

Diese Dissertation analysiert die Funktionsweise, Dimensionierung und die technisch-wirtschaftliche Eignung eines neuartigen Klassierverfahrens, welches für die Nachrüstung von Aufbereitungsanlagen durch einen Einsatz an Bandübergabestationen konzipiert ist. Dabei verfügt das Verfahren über eine spezielle mechanische Dispergiereinheit, die die Partikel dispergiert, wirft und eine Strömung erzeugt. Neben der Dispergiereinheit ist das Verfahren, welches anhand einem Prototypen im Labor untersucht wird, aus einer Materialaufgabe, einem Strömungskanal und einer Absauge-Einheit aufgebaut. Die Funktionsweise und Dimensionierung dieser Komponenten lässt sich anhand von physikalischen und strömungsmechanischen Zusammenhängen beschreiben, welche durch Laboruntersuchungen validiert werden können.

Aufbauend auf die Dimensionierungen der Komponenten lassen sich die Bauhöhe und der Energieverbrauch des Verfahrens anhand von nur zwei Gleichungen in Relation zum Durchsatz simulieren. Hierfür ist die zulässige Gutbeladung des Klassierers im Labor bestimmt worden. Diese Simulationen lassen sich mit einer Datenanalyse, welche Daten von über 300 Klassieren umfasst, vergleichen. Hierbei lässt sich erkennen, dass sich das Verfahren besonders durch seine geringe Bauhöhe auszeichnet und dabei vergleichsweise energieeffizient arbeitet. Die prinzipielle, technisch-wirtschaftliche Eignung lässt sich folglich bestätigen. Allerdings sind für einen industriellen Einsatz weitere Verfahrensoptimierungen und Untersuchungen notwendig, welche am Ende dieser Dissertation vorgestellt werden.

Abstract

Aggregates are an important construction raw material that is used in building construction materials such as asphalt. During the extraction and processing of aggregates, between 10 wt. % and 20 wt. % of the fines are comminuted to rock filler, i.e. to grain sizes below $63\text{ }\mu\text{m}$ [1]. The rock filler content influences the mechanical properties of the asphalt by binding the bitumen. A too high filler content leads to over-hard, brittle asphalt, whereas a too low filler content results in soft asphalt that can be deformed by stresses [2] [3]. In order to ensure the required mechanical properties of the asphalt, a filler content of between 5 wt. % and 10 wt. % is required [4].

Various classification methods are used to reduce the rock filler content. Many older processing plants in particular no longer have the necessary capacity to classify their entire production. However, aggregates with a too high filler content can hardly be sold on the market and are therefore deposited on stockpiles. For the processing of these raw materials a low-built process is required, which can be integrated into ongoing conveying and processing operations and is therefore suitable for retrofitting existing processing plants.

This dissertation analyzes the functionality, dimensioning and the technical-economic suitability of a novel classification process, which is designed for the retrofitting of processing plants by means of an application at belt transfer stations. The process has a special mechanical dispersion unit which disperses the particles, throws them and generates a flow. In addition to the dispersion unit, the process, which is investigated in the laboratory using a prototype, consists of a material feed, a flow channel and an exhaust unit. The mode of operation and dimensioning of these components can be described by physical and flow-mechanical correlations, which can be validated by laboratory tests.

Based on the dimensioning of the components, the overall height and energy consumption of the process can be simulated in relation to the throughput using only two equations. For this purpose, the permissible good load of the classifier has been determined in the laboratory. These simulations can be compared with a data analysis, which includes data from over 300 classifiers. Here it can be seen that the process is particularly characterized by its low overall height and is comparatively energy efficient. The basic, technical-economic suitability can therefore be confirmed. However,

further process optimizations and investigations are necessary for an industrial application, which are presented at the end of this dissertation.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Symbolverzeichnis	XIV
Formelverzeichnis	XVIII
1 Einleitung	1
2 Die Rolle von Gesteinsfüller in der Steine- und Erden- Industrie	4
3 Stand der Technik der Entfüllerung von Gesteinskörnungen	11
3.1 Siebklassierung	11
3.2 Hydroklassierung.....	14
3.3 Aeroklassierung.....	17
3.4 Zusammenfassung des Stands der Technik	28
4 Methodik.....	33
5 Funktionsweise der Neuentwicklung.....	35
5.1 Funktionsweise der Materialaufgabe	37
5.2 Funktionsweise der Dispergiereinheit.....	47
5.3 Funktionsweise des Strömungskanals	73
5.4 Funktionsweise der Absauge-Einheit	88
5.5 Zusammenhang zwischen den Hauptkomponenten der Neuentwicklung ..	96
6 Untersuchungen der Trennschärfe und Gutbeladung der Laboranlage .	103
6.1 Einfluss verschiedener Parameter auf die Trennschärfe	103
6.2 Bestimmung der zulässigen Gutbeladung	113
6.3 Zusammenfassung der Laboruntersuchungen	114
7 Analyse der Neuentwicklung.....	117
7.1 Baugröße und Energiebedarf in Relation zum Durchsatz.....	117
7.2 Bewertung der Neuentwicklung	123
8 Fazit	133
9 Ausblick	140
10 Literaturverzeichnis	143
Anhang 1: Aufteilung der Steine- und Erden- Produktion in Europa 1997	152
Anhang 2: Entwicklung der Natursteinproduktion in Deutschland.....	153
Anhang 3: Begriffsdefinitionen nach TL Gestein-StB04	154

Anhang 4: Feinanteilspezifische Kategorien gemäß DIN EN 13043.....	156
Anhang 5: Feinanteilspezifische Kategorien gemäß DIN EN 12620.....	157
Anhang 6: Normen und Verordnungen für Asphalt, Beton und Zement	158
Anhang 7: Partikelbewegung im Fluid.....	159
Anhang 8: Quantitative Analyse des Stands der Technik.....	167
Anhang 9: Beschreibung der Messgeräte	172
Anhang 10: Beschreibung des Klassierguts.....	174
Anhang 11: Untersuchungen der Strömungsprofile	175
Anhang 12: Untersuchungen zur Partikelzerkleinerung durch Prall	178
Anhang 13: Messdaten der Klassierversuche	180

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verwendung von Naturstein 2013 [8].....	5
Abbildung 2: Abbauprozess von Natursteinen im Tagebau (Foto Kreuzmann)	6
Abbildung 3: Aufbereitungsprozess der Natursteine (Foto Kreuzmann)	6
Abbildung 4: Einteilung der Klassierverfahren	11
Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines Hochfrequenzsiebs gemäß der dreieckigen FINE-LINE Siebmaschine der Firma Haver & Böcker [25]	13
Abbildung 6: Prinzipskizze eines Zyklons gemäß Rippert Anlagentechnik GmbH [30]	15
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Wirkprinzips eines Querstrom- Schwerkraftsichters [31]	19
Abbildung 8: Prinzipskizze: Querstrom-Windsichter zur Entfüllung gemäß der CMP AG [35]	21
Abbildung 9: Gegenstrom-Schwerkraftsichter [36]	22
Abbildung 10: Prinzipskizze: Gegenstrom-Schwerkraftsichter zur Entfüllung gemäß der IKW Industrieanlagenbau GmbH [37].....	23
Abbildung 11: Prinzipskizze: Kaskadensichter zur Entfüllung gemäß der Scheuch GmbH [3]	24
Abbildung 12: Abweiseradsichter [39]	26
Abbildung 13: Fotografische Darstellung des Klassierers als Testanlage	35
Abbildung 14: Schematische Darstellung des Klassierers und seiner 4 Hauptkomponenten	35
Abbildung 15: Schematische Darstellung der Materialaufgabe	38
Abbildung 16: Fotografische Darstellung der Aufgabeeinheit für die Laboruntersuchungen (Ansicht von hinten (links) und Seitenansicht (rechts))	41
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Aufgabeeinheit für die Laboruntersuchungen.....	42
Abbildung 18: Zusammenhang zwischen der Neigung der Materialaufgabe und dem Massenstrom sowie der Fördergeschwindigkeit.....	44
Abbildung 19: Fotografische Darstellung der Dispergiereinheit in einer Seitenansicht (links) und einer Ansicht von oben (rechts)	47
Abbildung 20: Schematische Darstellung der Dispergiereinheit	48
Abbildung 21: Schematische Darstellung der Dispergiereinheit als Strömungserzeuger	50

Abbildung 22: Zusammenhang zwischen der Drehzahl der Dispergiereinheit und der Strömungsgeschwindigkeit.....	53
Abbildung 23: Eingehende und ausgehende Luftvolumenströme der Dispergiereinheit	54
Abbildung 24: Korrelation zwischen der Stromaufnahme (Leistung) und Drehzahl der Dispergiereinheit	55
Abbildung 25: Zusammenhang zwischen theoretisch bestimmter und im Labor gemessener Leistung	56
Abbildung 26: Schematische Darstellung der Dispergiereinheit für die Fallbewegung der Partikel im Wirkungsbereich der Dispergiereinheit.....	60
Abbildung 27: Schematische Darstellung der Dispergiereinheit für den Impuls, welchen die Partikel bei Kollision mit der Dispergiereinheit erfahren	63
Abbildung 28: Zusammenhang zwischen gemessener und berechneter Leistung der Dispergiereinheit (Wurf + Strömung)	69
Abbildung 29: Schematische Darstellung des Klassierers mit einem Fokus auf dem Strömungskanal	73
Abbildung 30: Fotografische Darstellung des Klassierers mit einem Fokus auf dem Strömungskanal	74
Abbildung 31: Gutbeladungen gängiger Siebmodelle in Abhängigkeit vom Durchsatz [41]	76
Abbildung 32: Abbremsung der Partikel durch die Luftwiderstandskraft in Relation zur Partikelgröße bei einer Relativgeschwindigkeit von 1 m/s.....	83
Abbildung 33: Geschwindigkeits- und Höhenprofil von Partikeln mit einer Größe von 63 μm	84
Abbildung 34: Partikelwurfbahnen in Abhängigkeit zur Korngröße ausgehend von der Position (-0,02 / 0,224).....	85
Abbildung 35: Wurfweiten der Partikel an den sechs kritischen Punkten in Abhängigkeit der Korngröße.....	86
Abbildung 36: Fotografische Darstellung der Absauge-Leitung am Ende des Strömungskanals.....	88
Abbildung 37: Korrelation zwischen dem an der Öffnung zum Strömungskanal erzeugten Volumenstrom und der Einstellungsstufe der Absauge-Einheit.....	89
Abbildung 38: Korrelation zwischen dem erzeugten Volumenstrom und der Stromaufnahme des Lüfters	91

Abbildung 39: Einfluss der Drehzahl der Dispergiereinheit und der damit verbundenen Strömung auf den Volumenstrom im Absauge-Kanal.....	92
Abbildung 40: Staubaustritt unter der Materialaufgabe bei unzureichender Absauge-Strömung.....	93
Abbildung 41: Schematische Darstellung der Laboranlage mit allen Parametern ..	96
Abbildung 42: Zusammenfassung der Testergebnisse: Einfluss des Durchsatzes auf die Trennschärfe (Ausgangsfülleranteil: 11,8 %).....	104
Abbildung 43: Untersuchungsergebnisse der Trennschärfe bei in Reihe geschalteten Klassierprozessen (Ausgangsfülleranteil: 11,8 %)	106
Abbildung 44: Zusammenfassung der Testergebnisse: Einfluss der Drehzahl auf die Trennschärfe (Ausgangsfülleranteil: 11,8 %).....	107
Abbildung 45: Zusammenfassung der Testergebnisse: Einfluss der Absauge-Strömung auf die Trennschärfe (Ausgangsfülleranteil: 11,8 %)	109
Abbildung 46: Zusammenfassung der Testergebnisse: Einfluss der Länge des Strömungskanals auf die Trennschärfe (Ausgangsfülleranteil: 11,8 %)	110
Abbildung 47: Zusammenfassung der Testergebnisse: Fehlkornanteil ($d > 0,63 \mu\text{m}$) im Feingut.....	112
Abbildung 48: Zusammenfassung der Testergebnisse: Einfluss der Gutbeladung auf die Trennschärfe (Ausgangsfülleranteil: 11,8 %)	113
Abbildung 49: Berechnung der benötigten Länge der Schlagleisten in Abhängigkeit des Durchsatzes.....	119
Abbildung 50: Berechnung der Bauhöhe und des Anlagenvolumens in Abhängigkeit des Durchsatzes.....	120
Abbildung 51: Berechnung des Energieverbrauchs in Abhängigkeit des Durchsatzes	122
Abbildung 52: Einfluss einer Anlagenoptimierung auf die Anlagenhöhe und die Leistung.....	123
Abbildung 53: Vergleich der Bauhöhe der Neuentwicklung mit dem Stand der Technik.....	124
Abbildung 54: Vergleich des Energieverbrauchs der Neuentwicklung mit dem Stand der Technik.....	125
Abbildung 55: Umfangsgeschwindigkeiten der Schlagleisten in Relation zum Durchsatz	130
Abbildung 56: Optimierungsziele und –Parameter	139

Abbildung 57: Produktionsmenge von Natursteinen [Mt] [8]	153
Abbildung 58: Schematische Darstellung der Kräfte bei der Partikelbewegung im Fluid [46].....	159
Abbildung 59: Zusammenhang zwischen Reynolds-Zahl, Partikelgröße und Sinkgeschwindigkeit	165
Abbildung 60: Vergleich der Durchsatzraten der verschiedenen Klassierer im Rahmen der Datenanalyse [41]	168
Abbildung 61: Relation zwischen der Bauhöhe und dem Durchsatz verschiedener Klassierer [41]	169
Abbildung 62: Relation zwischen dem Bauvolumen und dem Durchsatz verschiedener Klassierer [41]	170
Abbildung 63: Relation zwischen der Anlagenleistung und dem Durchsatz verschiedener Klassierer	171
Abbildung 64: Fotografische Abbildung der Messgeräte: Luftstrahlsieb, Hitzdraht- Anemometer und Leistungsmesser	172
Abbildung 65: Verteilungskurve des Fülleranteils des Klassierguts gemessen an n = 100 Proben.....	174
Abbildung 66: Strömungsprofil bei einer Drehzahl von 13,4 Umdrehungen pro Sekunde	175
Abbildung 67: Fotografische Abbildung der Leitbleche zur Strömungslenkung....	176
Abbildung 68: Korngrößenverteilungen der Partikelkollektive vor und nach fünffachem Aufprallen mit den Schlagleisten.....	178

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Feine und grobe Gesteinskörnungen nach Anwendungsbereich gemäß TL Gestein-StB04 [4]	8
Tabelle 2: Höchstgehalt für den Gehalt an Feinanteilen gemäß TL Gestein-StB 04 [4]	8
Tabelle 3: Einteilung der Windsichter [32]	18
Tabelle 4: Qualitativer Vergleich des Stands der Technik	29
Tabelle 5: Zusammenfassung der Dimensionierung der Aufgabeeinheit	45
Tabelle 6: Dimensionierung der Dispergiereinheit als Strömungserzeuger: Ausgangsparameter	52
Tabelle 7: Dimensionierung der Dispergiereinheit als Impulsgeber: Ausgangsparameter	66
Tabelle 8: Dimensionierung der Dispergiereinheit als Impulsgeber: Zielparameter	67
Tabelle 9: Dimensionierung des Strömungskanals bei der Strömung des Feingut- Luft-Fluids: Ausgangsparameter	77
Tabelle 10: Geschwindigkeit der Strömung durch die Dispergiereinheit in Abhängigkeit der Kanallänge.....	78
Tabelle 11: Dimensionierung des Strömungskanals zur Bestimmung der Partikelwurfbahnen.....	81
Tabelle 12: Parameter der Bewegungsgleichung zur Bestimmung der Partikelwurfbahnen.....	82
Tabelle 13: Zusammenfassung der Parameter der Absauge-Einheit	94
Tabelle 14: Zusammenfassung der wesentlichen Parameter der Materialaufgabe	97
Tabelle 15: Zusammenfassung der wesentlichen Parameter der Dispergiereinheit	98
Tabelle 16: Zusammenfassung der wesentlichen Parameter des Strömungskanals	99
Tabelle 17: Zusammenfassung der wesentlichen Parameter der Absauge-Einheit	100
Tabelle 18: Natursteinproduktion in Europa und weltweit nach Coope 1997 [10].	152
Tabelle 19: Zusammensetzung von groben Gesteinskörnungen gemäß TL Gestein- StB 04 [4].....	154
Tabelle 20: Zusammensetzung von feinen Gesteinskörnungen gemäß TL Gestein- StB 04 [4].....	155

Tabelle 21: Zulässige Kategorie-spezifische Gesteinsfülleranteile in Gesteinskörnungen gemäß EN 13043:2001 [20]	156
Tabelle 22: Zulässige Kategorie-spezifische Gesteinsfülleranteile in Gesteinskörnungen gemäß EN 12620:2002 [47]	157
Tabelle 23: Berechnung der Widerstandsbeiwerte bei visko-turbulenter Strömung [46]	163
Tabelle 24: Berechnung der Sinkgeschwindigkeit bei visko-turbulenter Strömung [46]	163
Tabelle 25: Material- und Strömungseigenschaften für die Aeroklassierung von Gabbrofüller.....	166
Tabelle 26: Strömungsverteilung beim Einsatz verschiedener Leitbleche	176
Tabelle 27: Messdaten 1	180
Tabelle 28: Messdaten 2	181
Tabelle 29: Messdaten 3	181
Tabelle 30: Messdaten 4	182
Tabelle 31: Messdaten 5	182

Abkürzungsverzeichnis

Bzw.	Beziehungsweise
°C	Grad Celsius
Ca.	Circa
d. h.	Das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
kg	Kilogramm
LKW	Lastkraftwagen
m	Meter
mm	Millimeter
µm	Mikrometer
Mt	Millionen Tonnen
SLKW	Schwerlastkraftwagen
t	Tonne (n)
TL	Technische Lieferbedingungen
TRGS	Technische Regel für Gefahrstoffe
u. a.	Unter anderem
u. U.	Unter Umständen
z. B.	Zum Beispiel

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
a_A	Beschleunigung bei der Materialaufgabe	m/s^2
A_A	Querschnittsfläche der Absauge-Leitung	m^2
A_p	Partikeloberfläche	m^2
A_T	Benötigte Fläche einer Trennzone	m^2
b	Breite des Klassierers	m
b_A	Breite des Aufgabebehälters im Labor	m
$c_f(Re_x)$	Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl	-
c_w	Widerstandsbeiwert	-
d_A	Durchmesser der Absauge-Leitung	m
d_T	Durchmesser der Trennzone	m
E_A	Einstellung der Absauge-Einheit	-
E_D	Einstellung der Dispergiereinheit	-
F_{Ah}	Hangabtriebskraft bei der Materialaufgabe	N
F_{AR}	Reibungskraft bei der Materialaufgabe	N
F_b	Auftriebskraft	N
F_{DD}	Kräfte bei der Dispergierung	N
F_f	Strömungswiderstandskraft	N
$F_{f,st}$	Widerstandskraft: Laminare Umströmung	N
F_g	Gravitationskraft	N
F_z	Zentrifugalkraft	N
F_B	Schüttgutfaktor	-
F_{DS}	Faktor zur Bemessung der Effizienz der Dispergiereinheit bei der Strömungserzeugung	-
F_{krit}	Faktor, der die relative, maximale Falltiefe in Relation zur Länge der Schlagleisten angibt	-
g	Gravitationsbeschleunigung ($9,81 m/s^2$)	m/s^2
h	Bauhöhe der Neuentwicklung	m
h_A	Höhe des Aufgabestroms	m
h_{AD}	Abstand zwischen der Drehachse und der Materialaufgabe	m
h_{DS}	Höhe der Öffnung zum Strömungskanal	m
h_{DG}	Höhe der Öffnung unter der Dispergiereinheit	m
h_t	Abstand der Absaugung zur Trennzone	m

\vec{I}_{Di}	Impuls, der auf die Partikel wirkt	kg m s ⁻¹
L	Länge der Neuentwicklung	m
L_A	Länge der Aufgabeeinheit (Rutsche)	m
l_A	Länge des Aufgabebehälters im Labor	m
L_D	Länge der Schlagleisten	m
L_{Di}	Abstand des Aufprallpunkts zur Drehachse	m
L_S	Länge des Strömungskanals	m
m	Masse	kg
M	Masse der Probe	kg
m_P	Masse der Partikel	kg
\dot{M}	Durchsatz bzw. Massenstrom	kg/s
N	Anzahl der Schlagleisten	-
N_{DL}	Anzahl der Luftlöcher	-
n	Drehzahl der Dispergiereinheit	s ⁻¹
P	Leistung der Neuentwicklung	W
P_{Ab}	Leistung der Absauge-Einheit	W
P_D	Leistung der Dispergiereinheit	W
P_{DS}	Leistung der Dispergiereinheit zur Strömungserzeugung	W
P_{DW}	Leistung der Dispergiereinheit zum Werfen der Partikel	W
P₀	Startposition des Aufgabestroms	-
P_{W0}	Ausgangsordinate der Partikelwurfbahnen	-
P_A	Endposition des Aufgabestroms	-
P_{D1}	Koordinate der Partikel beim Eintritt in den Wirkungsbereich der Dispergiereinheit	-
P_{D2}	Koordinate bei maximaler Falltiefe	-
P_i	Koordinate des Impulses	-
r	Radius	m
Re	Reynolds-Zahl	-
t_A	Zeitdauer der Materialaufgabe	s
t_{D1}	Fallzeit bis zum Eintritt in den Wirkungsbereich	s
t_{D2}	Fallzeit bis zur maximalen Falltiefe	s
u	Geschwindigkeit der Partikel	m/s
v	Geschwindigkeit des Fluids	m/s

v_0	Startgeschwindigkeit bei der Materialaufgabe	m/s
v_A	Endgeschwindigkeit bei der Materialaufgabe	m/s
v_A	Endgeschwindigkeit bei der Materialaufgabe	m/s
v_{Ax}	Endgeschwindigkeit bei der Materialaufgabe (horizontal)	m/s
v_{Ay}	Endgeschwindigkeit bei der Materialaufgabe (vertikal)	m/s
v_{D1}	Geschwindigkeit beim Eintritt in den Wirkungsbereich	m/s
v_{D2}	Geschwindigkeit beim maximaler Falltiefe	m/s
v_{Di}	Geschwindigkeit an einer beliebigen Stelle um Wirkungsbereich	m/s
v_{DS}	Strömungsgeschwindigkeit der Strömung der Dispergiereinheit	m/s
v_{ef}	Effektive, mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Klassierraum	m/s
v_U	Umfangsgeschwindigkeit	m/s
$\overrightarrow{v_{W0}}$	Startgeschwindigkeit der Partikelwurfbahnen	m/s
$\overrightarrow{v_{Di}}$	Geschwindigkeit durch den Impuls	m/s
V	Volumen der Neuentwicklung	m ³
V_p	Partikelvolumen	m ³
V_s	Volumen des Strömungskanals	m ³
V_D	Volumen der Dispergiereinheit	m ³
\dot{V}_A	Strömung der Absauge-Einheit	m ³ /s
\dot{V}_{DS}	Strömung der Dispergiereinheit	m ³ /s
\dot{V}_{ef}	Effektive Strömung im Strömungskanal	m ³ /s
\dot{V}_{SE}	Volumenstrom am Ende des Kanals	m ³ /s
w	Sinkgeschwindigkeit	m/s
w_{krit}	Sinkgeschwindigkeit des Trennkorns	m/s
%Feingut	Feingutanteil	-
%G	Gutbeladung	-
%GD	Gutbeladung in der Dispergiereinheit	-
%G _{Feingut}	Feingutspezifische Gutbeladung	-
α_A	Neigung der Aufgabeeinheit	°
α_{Di}	Drehwinkel der Schlagleisten beim Aufprall auf die Partikel	°
α_T	Winkel der Strömungsaufweitung	°
ΔL_{DD}	Abstand zwischen dem Wirkungsbereich der Dispergiereinheit und der Innenauskleidung	m

Δp_A	Druckverlust bei der Absaugung	N/m ²
Δp_{DS}	Druckverlust bei der Strömungserzeugung	N/m ²
$\Delta \dot{V}_{DS}$	Strömungsabnahme in Relation zur Länge des Strömungskanals	m ³ /s
ΔX_A	Weite der Aufgabeeinheit	m
ΔX_{D1}	Horizontaler Abstand zwischen der Materialaufgabe und der Drehachse der Dispergiereinheit	m
ΔX_{DS}	Horizontaler Abstand zwischen der Drehachse und dem Strömungskanal	m
ΔY_A	Höhe der Aufgabeeinheit	
ΔY_{AD}	Vertikaler Abstand zwischen dem Wirkungsbereich der Dispergiereinheit und der Materialaufgabe	m
ΔY_{D1}	Falltiefe beim Eintritt in den Wirkungsbereich	m
ΔY_{D2}	Maximale Falltiefe	m
η	Wirkungsgrad	-
η	Dynamische Viskosität des Fluids	kg m ⁻¹ s ⁻¹
ρ_f	Fluiddichte	kg/m ³
ρ_p	Dichte der Partikel	kg/m ³
μ_{AR}	Reibungskoeffizient bei der Materialaufgabe	-
ζ	Strömungswiderstandsbeiwert	-

Formelverzeichnis

(1) Formel 1: Beziehung zwischen der Sichtergeometrie und der Partikel- und Fluidgeschwindigkeit	19
(2) Formel 2: Materialaufgabe: Neigung der Rutsche	39
(3) Formel 3: Materialaufgabe: Effektive Geschwindigkeit v_A (I)	39
(4) Formel 4: Materialaufgabe: Dauer des Rutschvorgangs t_A	39
(5) Formel 5: Materialaufgabe: Effektive Geschwindigkeit v_A (II)	39
(6) Formel 6: Materialaufgabe: Vektorielle Darstellung der Geschwindigkeit v_A	39
(7) Formel 7: Materialaufgabe: Referenzkoordinaten	39
(8) Formel 8: Materialaufgabe: Höhe des Förderstroms	40
(9) Formel 9: Materialaufgabe: Probenmasse	42
(10) Formel 10: Materialaufgabe: Effektive Geschwindigkeit v_A im Labor	43
(11) Formel 11: Materialaufgabe: Massenstrom: empirischer Zusammenhang	44
(12) Formel 12: Materialaufgabe: Effektive Geschwindigkeit: empirischer Zusammenhang	44
(13) Formel 13: Materialaufgabe: Vertikale Geschwindigkeit	45
(14) Formel 14: Dispergiereinheit: Luftvolumenstrom	50
(15) Formel 15: Dispergiereinheit: Luftvolumenstrom: Kontinuitätsgleichung	50
(16) Formel 16: Dispergiereinheit: Druckverlust	51
(17) Formel 17: Dispergiereinheit: Energiebedarf zur Strömungserzeugung	51
(18) Formel 18: Dispergiereinheit: Luftvolumenstrom: Proportionalitäten	51
(19) Formel 19: Dispergiereinheit: Drehzahleinstellung	52
(20) Formel 20: Dispergiereinheit: Strömungsgeschwindigkeit: empirischer Zusammenhang	53
(21) Formel 21: Dispergiereinheit: Strömungsgeschwindigkeit: theoretischer Zusammenhang	53
(22) Formel 22: Dispergiereinheit: Anlagenleistung: empirischer Zusammenhang in Relation zur Drehzahl	54
(23) Formel 23: Dispergiereinheit: Anlagenleistung: empirischer Zusammenhang in Relation zur Geschwindigkeit	55
(24) Formel 24: Dispergiereinheit: Anlagenleistung: theoretischer Zusammenhang	55
(25) Formel 25: Dispergiereinheit: Strömungsabnahme durch Strömungswiderstände	57

(26) Formel 26: Dispergiereinheit: Koordinaten der Partikel beim Eintritt in den Wirkungsbereich.....	61
(27) Formel 27: Dispergiereinheit: Geschwindigkeit beim Eintritt in den Wirkungsbereich.....	61
(28) Formel 28: Dispergiereinheit: Falltiefe bis zum Eintritt in den Wirkungsbereich.....	61
(29) Formel 29: Dispergiereinheit: Fallgeschwindigkeit beim Eintritt in den Wirkungsbereich.....	61
(30) Formel 30: Dispergiereinheit: Koordinate bei maximaler Falltiefe	61
(31) Formel 31: Dispergiereinheit: Fallzeit bei maximale Falltiefe	62
(32) Formel 32: Dispergiereinheit: Geschwindigkeit bei maximale Falltiefe.....	62
(33) Formel 33: Dispergiereinheit: Maximale Falltiefe	62
(34) Formel 34: Dispergiereinheit: Mindest-Drehzahl (I)	62
(35) Formel 35: Dispergiereinheit: Mindest-Drehzahl (II)	62
(36) Formel 36: Dispergiereinheit: Impuls.....	63
(37) Formel 37: Dispergiereinheit: Länge der Schlagleisten beim Impuls.....	64
(38) Formel 38: Dispergiereinheit: Falltiefe.....	64
(39) Formel 39: Dispergiereinheit: Koordinate beim Impuls.....	64
(40) Formel 40: Dispergiereinheit: Drehwinkel beim Impuls	64
(41) Formel 41: Dispergiereinheit: Impulsvektor	64
(42) Formel 42: Dispergiereinheit: Geschwindigkeit durch den Impuls	64
(43) Formel 43: Dispergiereinheit: Bewegungsgleichung nach dem Impuls	65
(44) Formel 44: Dispergiereinheit: Anlagenleistung zum Wurf der Partikel	65
(45) Formel 45: Dispergiereinheit: Empirische Anlagenleistung zum Wurf der Partikel.....	68
(46) Formel 46: Dispergiereinheit: Theoretische Anlagenleistung zum Wurf der Partikel.....	68
(47) Formel 47: Dispergiereinheit: Gesamtleistung der Dispergiereinheit (I)	68
(48) Formel 48: Dispergiereinheit: Gesamtleistung der Dispergiereinheit (II)	69
(49) Formel 49: Dispergiereinheit: Kraft bei der Dispergierung.....	71
(50) Formel 50: Dispergiereinheit: Volumen des Dispergierraums	72
(51) Formel 51: Strömungskanal: Summe der Teil- Luftströmungen	75
(52) Formel 52: Strömungskanal: Effektive Strömung	75
(53) Formel 53: Strömungskanal: zulässige Gutbeladung.....	76

(54) Formel 54: Strömungskanal: Zusammenhang zwischen Gutbeladung und den Dimensionen des Strömungskanals	77
(55) Formel 55: Strömungskanal: Bewegungsgleichung beim Wurf	79
(56) Formel 56: Strömungskanal: Startposition beim Wurf	79
(57) Formel 57: Strömungskanal: Startgeschwindigkeit beim Wurf	79
(58) Formel 58: Strömungskanal: Strömungswiderstandskraft	80
(59) Formel 59: Strömungskanal: Abbremsung aufgrund des Luftwiderstands	80
(60) Formel 60: Strömungskanal: effektive Beschleunigung der Partikel	80
(61) Formel 61: Absauge-Einheit: Strömung des Lüfters	88
(62) Formel 62: Absauge-Einheit: Stromaufnahme	89
(63) Formel 63: Absauge-Einheit: Stromaufnahme in Relation zur Einstellung	90
(64) Formel 64: Absauge-Einheit: Stromaufnahme in Relation zum Volumenstrom	90
(65) Formel 65: Absauge-Einheit: Notwendige Strömung in Abhängigkeit der Drehzahl	93
(66) Formel 66: Absauge-Einheit: Strömungsgeschwindigkeit in der Trennzone	93
(67) Formel 67: Absauge-Einheit: Strömungsgeschwindigkeit in der Trennzone nach dem Kontinuitätsprinzip	94
(68) Formel 68: Absauge-Einheit: Fläche der Trennzone	94
(69) Formel 69: Dimensionierung der Neuentwicklung in Abhängigkeit zur Gutbeladung	100
(70) Formel 70: Zusammenhang zwischen der Drehzahl und der Länge der Schlagleisten	101
(71) Formel 71: Dimensionierung der Neuentwicklung	101
(72) Formel 74: Bauhöhe der Neuentwicklung	101
(73) Formel 73: Baugröße	101
(74) Formel 74: Energieverbrauch der Neuentwicklung	102
(75) Formel 75: Bauhöhe der Neuentwicklung	117
(76) Formel 76: Länge der Neuentwicklung	117
(77) Formel 77: Bauvolumen der Neuentwicklung	117
(78) Formel 78: Dimensionierung der Neuentwicklung	118
(79) Formel 79: Aufgabegeschwindigkeit	118
(80) Formel 80: Zusammenhang zwischen der Länge der Schlagleisten und dem Durchsatz	119
(81) Formel 81: Leistung der Neuentwicklung	121

(82) Formel 82: Dimensionierung der Neuentwicklung	136
(83) Formel 83: Energieverbrauch der Neuentwicklung	136
(84) Formel 84: Kräftegleichgewicht bei der Partikelbewegung im Fluid	159
(85) Formel 85: Partikelgeschwindigkeit im Fluid	159
(86) Formel 86: Zentrifugalkraft	160
(87) Formel 87: Gravitationskraft	160
(88) Formel 88: Partikelmasse	160
(89) Formel 89: Auftriebskraft	160
(90) Formel 90: Widerstandskraft: Kräftegleichgewicht	161
(91) Formel 91: Widerstandskraft: Allgemeine Betrachtung	161
(92) Formel 92: Widerstandskraft: Ausformuliertes Kräftegleichgewicht	161
(93) Formel 93: Sinkgeschwindigkeit: Allgemeine Betrachtung	161
(94) Formel 94: Reynolds-Zahl	161
(95) Formel 95: Widerstandskraft: Laminare Umströmung	162
(96) Formel 96: Widerstandsbeiwert: Laminare Umströmung	162
(97) Formel 97: Sinkgeschwindigkeit: Laminare Umströmung	162
(98) Formel 98: Widerstandsbeiwert: Turbulente Umströmung	163
(99) Formel 99: Widerstandskraft: Turbulente Umströmung	163
(100) Formel 100: Sinkgeschwindigkeit: Turbulente Umströmung	164
(101) Formel 101: Reynolds-Zahlen bei einer Umströmung in Luft	164
(102) Formel 102: Sinkgeschwindigkeit von Gabbrofüller	165

1 Einleitung

Heutzutage wird der Begriff „Bergbau“ mit der Gewinnung von metallischen Rohstoffen wie Eisen, Kupfer oder Gold, oder mit dem Abbau von Energierohstoffen, wie Braun- und Steinkohle assoziiert. Da in Deutschland alle nennenswerten wirtschaftlichen Lagerstätten metallischer Rohstoffe bereits ausgebeutet sind und sich der Kohleabbau aus klimapolitischen Gründen seinem Ende neigt, setzen sich die Bergbauaktivitäten neben der Gewinnung von Industriemineralen und der Kali- und Salzgewinnung sowie dem Herstellen untertägiger Hohlräume zur Endlagerung oder Energiespeicherung maßgeblich aus der Gewinnung von Steinen und Erden zusammen.

Über 3500 Betriebe der Steine- und Erden- Industrie, worunter sich ca. 1200 Natursteinbetriebe befinden [5], produzieren in Deutschland jährlich über 200 Mio. t an Natursteinen [6]. Diese finden ihre Anwendung in der Beton- und Asphaltherstellung sowie in Schichten ohne Bindemittel oder als Gleisschotter [6]. Die Natursteinproduktion stellt die Grundlage für jedwede bauliche und straßenbauliche Maßnahme dar.

Beton und Asphalt gehören zu den bedeutendsten Baustoffen. Zur Beton- und Asphaltherstellung bedarf es der Herstellung von Gesteinskörnungen. Die weltweite Produktion an Gesteinskörnungen wird 2022 auf 66,2 Milliarden Tonnen geschätzt [7]. Natürliche Gesteinskörnungen bzw. gebrochene Natursteine machen dabei ca. die Hälfte dieser Gesteinskörnungen aus [8]. Die bergbauliche Gewinnung dieser erfolgt im Tagebau. Dort werden Natursteine zunächst mittels Sprengung gelöst, dann durch Bagger auf Schwerlastkraftwagen, sogenannten SLKW, geladen, welche diese zu einem Brecher transportieren, der diese zerkleinert. Anschließend erfolgen weitere Aufbereitungsschritte, die Zerkleinerungsprozesse und eine Klassierung in verschiedene Kornspektren beinhalten können.

Während dieser Gewinnungs-, Förder- und Aufbereitungsprozesse wird ein Teil des Natursteinedukts zwangsläufig auf weniger als 63 μm zerkleinert. Dieses Kornspektrum wird als Gesteinsfüller bezeichnet [4]. Der Gesteinsfülleranteil von gebrochenen Natursteinen liegt in der Regel zwischen 10 % und 20 % [1]. Gesteinsfüller wirkt sich negativ auf die technischen Eigenschaften der Produkte wie Asphalt aus. Bei der Asphaltherstellung resultiert ein hoher Fülleranteil in überhartem, zerbrechlichen und rissanfälligem Asphalt [2] [3]. Der im Asphalt zulässige Fülleranteil liegt zwischen 5 % und

10 % [9]. Bei Natursteinbrechsanden, die zur Betonherstellung verwendet werden, werden je nach Gesteinskörnung Fülleranteile von weniger als 16 % gefordert [4]. Für grobe Körnungen muss der Fülleranteil sogar unter 0,5 % liegen [4].

Eine Reduzierung des Gesteinsfülleranteils ist folglich unabdingbar. Gerade die Anforderungen an die Baustoffqualitäten, insbesondere an den Gesteinsfülleranteil, haben sich in den letzten Jahrzehnten zunehmend verschärft. Im Zuge dessen können einige Betriebe den Gesteinsfülleranteil der Körnungen mit den bestehenden Aufbereitungsanlagen nicht ausreichend reduzieren. Die Aufbereitungsanlagen weisen dabei oft keine ausreichenden Lager- und Klassier- Kapazitäten auf, um sämtliche gewonnen Gesteinskörnungen zu klassieren. Infolgedessen wird ein Teil dieser Körnungen auf Halden gelagert und kann der Wirtschaft nicht zugeführt werden.

Die Lösung dieser Problematik bedingt eine Anlage, welche in die Aufbereitungsprozesse integriert werden kann, ohne dass eine spezielle vorgeschaltete Lagerung der Gesteinskörnungen notwendig ist. Eine solche Anlage sollte niedrigbauend und energieeffizient sein, die für die Verwendungszwecke benötigte Trennschärfe aufweisen und für höhere Durchsätze geeignet sein. Durch die Niedrigbauweise kann nicht nur der Aufwand von Genehmigungsverfahren reduziert, sondern auch der Einsatz an Bandübergabestationen ermöglicht werden. Die Verfahren im Stand der Technik sind aufgrund einer komplexen oder hochbauenden Bauweise nicht für diesen Einsatzzweck geeignet.

Eine Vorrichtung, die die grundsätzlichen Merkmale für den genannten Einsatzzweck in der Steine- und Erden- Industrie aufweist ist in [10] skizziert. Die Prüfung der technischen Plausibilität dieser Grundidee, die strömungsmechanische Beschreibung des Funktionsprinzips und die Dimensionierung des Klassierverfahrens, basierend auf analytischen und labortechnischen Untersuchungen, stellen die Schwerpunkte dieser Dissertation dar. Zusätzlich erfolgt eine technisch-wirtschaftliche Validierung des Verfahrens in Anlehnung an den Stand der Technik.

Zunächst vertieft diese Dissertation in Kapitel 2 die Problemstellung von Gesteinsfüllern für die Steine- und Erden-Industrie. Anschließend wird in Kapitel 3 der Stand der Technik, d. h. die technischen Lösungen zur Entfüllung, die heutzutage Anwendung finden, vorgestellt. In Abgrenzung zum Stand der Technik werden die Anforderungen

an eine Neuentwicklung definiert. Diese Arbeit beschäftigt sich mit einer solchen Neuentwicklung, welche als Schlagleisten-Querstromsichter bezeichnet wird und überprüft die technisch-wirtschaftliche Eignung dieser. Die Methodik dieser Arbeit wird in Kapitel 4 vorgestellt. Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 5 die Beschreibung der Funktionsweise des neuentwickelten Verfahrens anhand einer Laboranlage. Diese besteht aus vier Hauptkomponenten, welche gesondert betrachtet werden. Die Funktionsweise dieser Komponenten wird anhand von physikalischen Zusammenhängen beschrieben, welche durch Laboruntersuchungen an der Testanlage validiert werden. Auf Basis dieser Zusammenhänge wird eine Dimensionierung dieser Komponenten in Abhängigkeit des Durchsatzes und der zulässigen Gutbeladung ermöglicht. Die Bestimmung der zulässigen Gutbeladung erfolgt mittels Laboruntersuchungen, welche in Kapitel 6 beschrieben werden. Neben der Gutbeladung stellt dieses Kapitel auch den Einfluss verschiedener weiterer Parameter auf die Trennschärfe vor und zeigt so Optimierungspotenziale des Verfahrens auf. Die Bestimmung der zulässigen Gutbeladung ermöglicht eine Dimensionierung der Neuentwicklung in Abhängigkeit verschiedener Durchsatzraten, welche in Kapitel 7 erfolgt. Anhand dieser Dimensionierung werden die Bauhöhe und der Energieverbrauch bei höheren Durchsätzen abgeschätzt und mit den Verfahren aus dem Stand der Technik verglichen. Hierauf aufbauend erfolgt eine quantitative, technisch-wirtschaftliche Bewertung des neuentwickelten Klassierverfahrens. Abschließend werden die Ergebnisse dieser Arbeit in einem Fazit zusammengefasst und ein Ausblick wird vorgestellt.

2 Die Rolle von Gesteinsfüller in der Steine- und Erden- Industrie

Produktion und Verbrauch von Gesteinskörnungen

Gesteinskörnungen stellen einen Teil der Steine und Erden dar. Gesteinskörnungen sind Baurohstoffe, welche die Grundlage für jedwede bauliche und infrastrukturelle Maßnahme legen. Sie setzen sich aus Sanden, Kiesen und gebrochenen Natursteinen zusammen [8] [11]. Als Bauzuschlagstoffe bilden sie das „Fundament jedweder Nation“ [12]. Sie finden ihren Einsatz in vielfältigen Anwendungen, wie in der Asphalt- und Betonherstellung, im Straßenbau, im Bau von Fundamenten und als Gleisschotter [6]. In Europa werden Gesteinskörnungen für den Bau von Wohngebäuden, für den Straßenbau, den Bau von Sozial- und Gewerbe- Gebäuden und zum Ausbau der Infrastruktur eingesetzt [13].

Im Jahr 2004 betrug die Produktion an Gesteinskörnungen weltweit ca. 15,5 Milliarden Tonnen, was einem Wert von ca. 70 Milliarden Dollar entsprach. Im Jahr 2022 soll diese Produktion auf 66,2 Milliarden Tonnen ansteigen [7]. Allein in Europa beträgt der jährliche Bedarf an Gesteinskörnungen ca. 5 t pro Einwohner – und in Deutschland sogar 9 pro Einwohner. Dies summiert sich zu einem Bedarf in 2016 von über 2,7 Milliarden Tonnen und einem Umsatz von 15 bis 20 Milliarden Euro in einer Branche, die in Europa ca. 220 Tausend Menschen beschäftigt [13].

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf gebrochenen Natursteinen [4]. Diese machen laut *Coope et. Al.* ca. die Hälfte der Steine und Erden Produktion in Europa aus [8]. Die *European Aggregates Association* beziffert diesen Anteil bei 47,4 % der insgesamt 2,7 Milliarden abgebauten Tonnen im Jahr 2016 [13]. Sande und Kiese machen ca. 40,3 % der Produktion aus. Die Restquote setzt sich aus Naturwerksteinen mit ca. 0,6 % der Produktion [8] und künstlichen sowie recycelten Gesteinskörnungen mit ca. 12,3 % der Produktion [13] zusammen. Naturwerksteine und Dachschiefer machen nur ca. 1,2 % der Natursteinprodukte aus. Den Großteil der im Steinbruch hergestellten Produkte stellen Gesteinskörnungen mit einem Anteil von ca. 98,8 % dar.

In Deutschland beträgt die jährliche Natursteinproduktion über 200 Mio. t. Für das Jahr 2020 wird die Produktion auf 219 Mio. t geschätzt [6]. Diese soll bis 2035 auf 224 Mio. t ansteigen. Bei einer guten Wirtschaftslage ist sogar ein Anstieg auf 250 Mio. t möglich [6]. Natürliche Gesteinskörnungen werden in Deutschland hauptsächlich in der Asphaltherstellung und in der Betonherstellung eingesetzt und finden überwiegend ihre

Anwendung im Tiefbau. Abbildung 1 gibt eine Übersicht über die Einsatzgebiete von Gesteinskörnungen [6]:

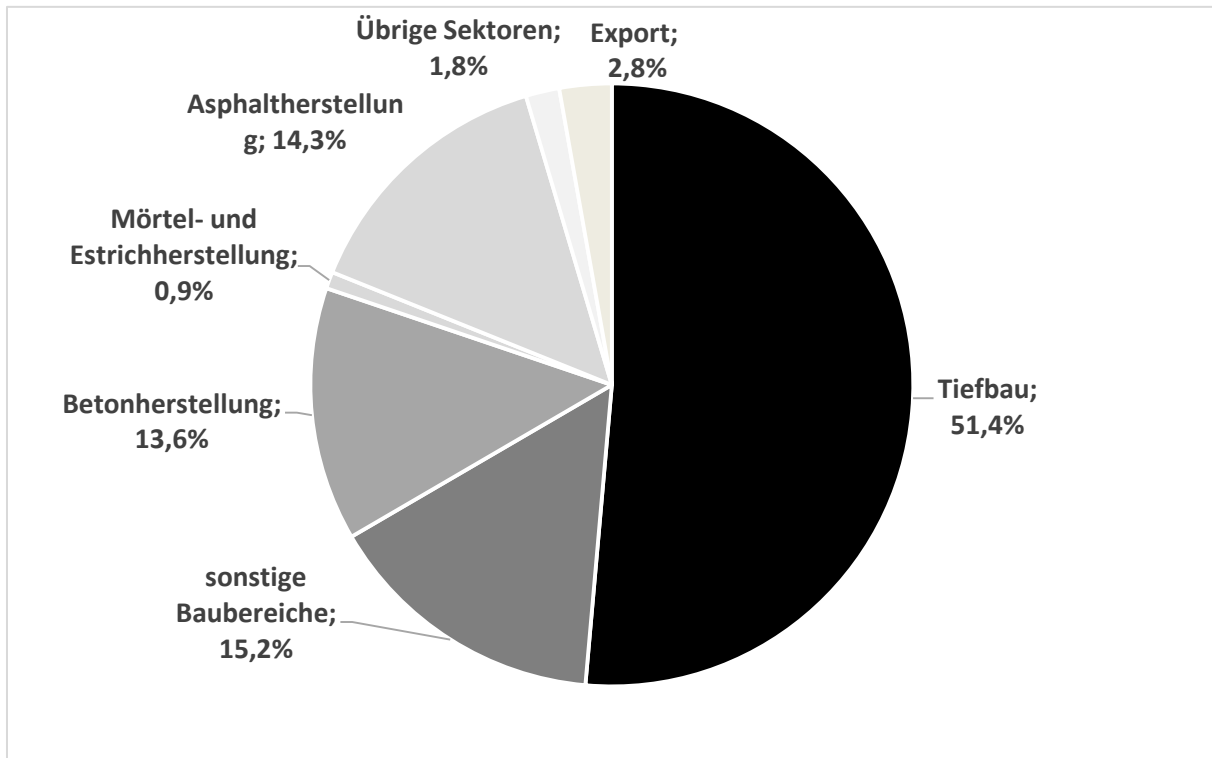


Abbildung 1: Verwendung von Naturstein 2013 [6]

Besonders bei der Asphalt- und Betonherstellung werden besondere Anforderungen an die Zusammensetzung der Körnungen von gebrochenen Natursteinen gestellt. Der Anteil von sehr feinen Körnungen, welche als Gesteinsfüller bezeichnet werden, ist in verschiedenen Normen geregelt, da dieser Anteil die Produktqualität dieser Baustoffe beeinflusst. Diese Normen sind z. B. die *DIN EN 13108* und die *DIN 13043* für Asphalt, die *DIN EN 197-1* und die *DIN 4426* für Beton sowie die *TL Gestein-StB04*.

Entstehung von Gesteinsfüller

Gemäß der *technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau*, werden Gesteinskörnungen in grobe Gesteinskörnungen, feine Gesteinskörnungen und Gesteinsfüller unterschieden [4]. Als Gesteinsfüller werden in der *TL Gestein-StB04* „Gesteinskörnungen, deren überwiegender Teil durch das 63 µm Sieb hindurch geht“ definiert [4]. In der Literatur wird die obere Grenzkorngröße von Gesteinsfüller ebenfalls als 63 µm [14] bzw. 90 µm [15] festgelegt. In dieser Arbeit bezieht sich der Begriff Gesteinsfüller, bzw. Füller, auf Körnungen, die kleiner-gleich 63 µm sind. Ge-

mäß der *TL Gestein-StB04* werden diese Körnungen als Feinanteil bezeichnet. In jedem Fall zählt Gesteinsfüller aufgrund seiner geringen Korngröße zu den Grobstäuben, welche das Partikelgrößenspektrum von 0 bis 100 µm umfassen [16]. Gesteinsfüller entsteht während des gesamten Abbau- und Aufbereitungsprozesses von gebrochenen Natursteinen (Gesteinskörnungen) durch Zerkleinerungsvorgänge. Die Schritte des Abbau- und Aufbereitungsprozesses sind schematisch in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt:



Abbildung 2: Abbauprozess von Natursteinen im Tagebau (Foto Kreuzmann)



Abbildung 3: Aufbereitungsprozess der Natursteine (Foto Kreuzmann)

Natursteine werden im Steinbruch gewonnen. Der erste Schritt bei der Gewinnung ist das Lösen des Rohstoffs aus dem Fels. Dies erfolgt in der Regel durch Sprengung. Das durch die Sprengung gelöste und folglich auch zerkleinerte Gestein wird als Haufwerk bezeichnet. Das Haufwerk weist Korngrößen von mehreren Dezimetern auf. Das

Haufwerk wird anschließend mit Baggern oder Radladern auf Schwerlastkraftwagen geladen, welche dieses zu einem Brecher zur Primärzerkleinerung transportieren. Während der auf das Lösen folgenden bergbaulichen Prozessschritte entsteht Gesteinsfüller einerseits durch mechanische Beanspruchungen beim Laden, Transportieren und Verkippen und andererseits während der Aufbereitung.

Während der Aufbereitung, insbesondere der Zerkleinerung, entsteht der Großteil des Gesteinsfüllers durch Schlagbeanspruchung und Abrieb. Die Primärzerkleinerung erfolgt in der Regel durch Brecher, die das Material auf Korngrößen von bis zu 300 mm zerkleinern. Den Backenbrechern sind oft Kegelbrecher zur weiteren Zerkleinerung nachgeschaltet. Die zerkleinerten bzw. gebrochenen Natursteine werden anschließend mit Siebmaschinen klassiert. Die gängigsten Produkte sind Brechsande und Splitte. Brechsande werden in Brechsande für die Asphaltherstellung mit Korngrößen von 0 bis 2 mm, in Brechsande für die Betonherstellung mit Korngrößen von 0 bis 4 mm [4] und in Brechsande für hydraulisch gebundene Tragschichten mit Korngrößen von 0 bis 6,3 mm unterschieden [4]. Splitte mit Korngrößen von 2 mm bis 32 mm und Edelsplitte mit Korngrößen von 2 mm bis 8 mm werden z. B. im Asphalt und Beton als Verschleißschicht eingesetzt. Ein weiteres Produkt der Aufbereitung von gebrochenen Natursteinen ist Schotter mit Korngrößen von 32 mm bis 63 mm, welcher z. B. als Gleisschotter Anwendung findet. Bei der Klassierung entsteht durch die Reibung zwischen den Körnungen untereinander sowie zwischen den Körnungen und den Sieben weiterer Gesteinsfüller. Ohne Entfüllerungsmaßnahmen kann der Gesteinsfülleranteil von Brechsanden zwischen 10% und 20% betragen [1].

Einfluss von Gesteinsfüller auf die Baustoffqualität

Ein derart hoher Anteil an Gesteinsfüller wirkt sich negativ auf die Qualität der Baustoffe aus, in welchen die Gesteinskörnungen eine Anwendung finden. Gesteinskörnungen werden als Zuschlagstoffe bei der Herstellung von Asphalt, Beton und Schichten ohne Bindemittel eingesetzt. Je nach Anwendungszweck sind für feine und grobe Gesteinskörnungen verschiedene Kornklassen festgelegt. Eine Kornklasse bezeichnet eine Gesteinskörnung gemäß der unteren (d) und oberen Siebgröße (D). Genaue Definitionen von Gesteinskörnungen betreffenden Begriffen sind in Anhang 3 zu finden [4]. Die Kornklassen feiner und grober Körnungen sind in Tabelle 1 gelistet:

	Anwendungsbereich Beton (gemäß DIN EN 12620)	Anwendungsbereich Asphalt (gemäß DIN EN 13043)	Anwendungsbereich Schichten ohne Bindemittel, (gemäß DIN EN 13242)
Feine Gesteinskörnung d/D	0 mm / \leq 4 mm	0 mm / \leq 2 mm	0 mm / $>$ 2 mm
Grobe Gesteinskörnung d/D	\geq 2 mm / \geq 4 mm	\geq 2 mm / \leq 4 mm	\geq 1 mm / $>$ 2 mm

Tabelle 1: Feine und grobe Gesteinskörnungen nach Anwendungsbereich gemäß TL Gestein-StB04 [4]

Je nach Verwendungszweck sind in den *DIN-Normen* und der *TL Gestein* die zulässigen Höchstwerte für den Gehalt an Feinanteilen dargelegt. Diese zulässigen Feinanteile liegen zwischen unter 3 % bis über 16 %. Diese Höchstwerte gemäß den *TL Gestein-StB 04* sind in Tabelle 2 dargestellt:

TL Gestein-StB 04: Höchstwerte für den Gehalt an Feinanteilen		
Korngruppen d/D [mm]	Siebdurchgang als Massenanteil in Prozent durch das 63- μ m-Sieb	Kategorie <i>f</i>
0/2 bis 0/5	\leq 3 \leq 16 $>$ 16	f_3 f_{16} $f_{\text{angegeben}}$
2/4 bis 32/63	\leq 0,5 \leq 1 \leq 1,5 \leq 2 \leq 4 $>$ 4	$f_{0,5}$ f_1 $f_{1,5}$ f_2 f_4 $f_{\text{angegeben}}$

Tabelle 2: Höchstgehalt für den Gehalt an Feinanteilen gemäß TL Gestein-StB 04 [4]

Diese Kategorien werden spezifisch in der *DIN EN 13043* für Asphalt und in der *DIN EN 12620* für Beton beschrieben. Eine Übersicht über die relevanten Normen ist in den Anhängen 4 bis 6 gegeben. Diese Höchstwerte sind in den Normen festgelegt worden, um die Qualität der Baustoffe zu gewährleisten. Während der Gesteinsfülleranteil im Beton eher unerhebliche Auswirkungen auf die Gefügebständigkeit des Baustoffs hat und in einem gewissen Maße sogar förderlich sein kann [17], wirkt sich ein zu hoher oder zu geringer Fülleranteil negativ auf die Qualität von Asphalt aus.

Asphalt ist ein Stoffgemisch, welches maßgeblich im Straßenbau eingesetzt wird. Es besteht aus Füllerstoffen, Gesteinskörnungen, Bindemittel und Zuschlagstoffen [18]. Als Gesteinskörnungen werden Brechsande mit einer Korngröße bis zu 2 mm und Edelsplitt mit einer Korngröße über >2 mm verwendet.

Asphalt ist hohen statischen und dynamischen Belastungen ausgesetzt - sei es durch den Straßenverkehr, durch wechselnde Temperaturen oder durch Frost und Wasser. Gesteinsfüller trägt maßgeblich dazu bei, dass Asphalt die nötigen Eigenschaften aufweist, um diesen Belastungen zu widerstehen. Der Gesteinsfülleranteil im Asphaltgemisch wirkt sich auf dessen mechanische und rheologische Eigenschaften aus. Der Gesteinsfüller übernimmt dabei die Aufgabe, Hohlräume zu füllen und somit den Asphalt zu stabilisieren, während er einen Teil der Klebkraft des Bindemittels bindet [2]. Ebenfalls trägt Füller zur Volumenerhöhung der Asphaltmischung, zur Haftfestigkeit innerhalb des Asphaltaggregatssystems und zur Nachverdichtungsbeständigkeit bei [3]. Der Gesteinsfülleranteil kann entweder als Eigenfülleranteil der Brechsande oder als Fremdfüller, welcher aus Entstaubungsanlagen rückgewonnen wird, der Asphaltmischung zugeführt werden [19].

Um optimale Eigenschaften der Mischungen zu erhalten, werden Fülleranteile von 5 %-10 % gefordert [9]. Dies ist in mehreren Normen und Verordnungen geregelt. Diese sind die:

- *DIN EN 13043* (Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen, Fassung 12/2002) [20]
- *DIN EN 13108* (Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton, Fassung 12/2016)
- *TL Gestein-StB 04* (Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Fassung 2018) [21] [4]

Wird der optimale Fülleranteil von 5 % bis 10 % über oder unterschritten kommt es zu verschiedenen negativen Folgen. Zu hohe Fülleranteile in der Asphaltmischung resultieren in einer Versteifung des Bitumens, was einerseits in einer erschwerten Verarbeitbarkeit des Asphalts im Herstellungsprozess resultiert und andererseits zu überhartem Asphalt führt. Dieser ist zerbrechlicher und bei niedrigen Temperaturen und Ermüdung rissanfälliger [2]. Zu niedrige Füllergehalte resultieren hingegen in einer Erhöhung des Bitumenanteils der Mischung. Dies führt insbesondere bei hohen Temperaturen zur Spurrillenbildung. Eine weitere Folge zu niedriger Füllergehalte ist das sogenannte „Asphaltbluten“, welches das Austreten des Bitumens aus der Asphaltmi-

schung beschreibt. Dies erfolgt bei hohen Temperaturen und meistens unter zusätzlichem Druck. Durch Asphaltbluten wird die Straßenoberfläche glatter und weicher, was die Verkehrssicherheit beeinträchtigen kann [3].

Um die Qualität von Asphalt zu gewährleisten, ist also ein definierter Füllergehalt erforderlich. D. h. die Brechsande, welche einen Füllergehalt von bis zu 20 % aufweisen, müssen zum Teil entfüllert werden.

3 Stand der Technik der Entfüllung von Gesteinskörnungen

Um die Anforderungen an die Produktqualität zu erfüllen, ist eine Entfüllung von Gesteinskörnungen als Teil des Aufbereitungsprozesses unabdingbar. Neben der Erzeugung produktspezifischer Korngemenge und einer Reduzierung der Staubbelastung trägt die Entfüllung ebenfalls zur Verringerung von Verschleiß an den Aufbereitungsanlagen, zur Verdünnung von Massenströmen, welche in der Entlastung nachgeschalteter Zerkleinerungsprozesse resultiert, und zur Reduzierung von wirtschaftlichen Verlusten bei. Zur Entfüllung werden gemäß dem Stand der Technik verschiedene Klassierverfahren eingesetzt.

Diese Verfahren werden in Verfahren der Sieb- und der Strömungsklassierung, welche die Hydro- und Aeroklassierung umfasst, unterteilt [22]:

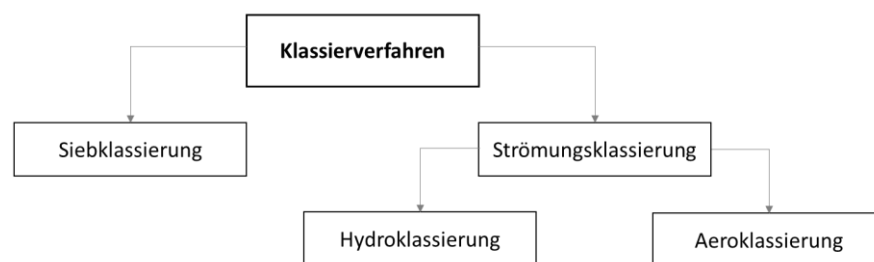


Abbildung 4: Einteilung der Klassierverfahren

Dieses Kapitel stellt den Stand der Technik der zur Entfüllung genutzten Klassierverfahren vor. Dabei werden zunächst die Sieb- und die Hydroklassierung beschrieben. Anschließend geht dieses Kapitel auf die Aeroklassierung bzw. die Windsichtung ein und stellt einige Anlagen gemäß ihres Wirkprinzips vor. Abschließend erfolgt sowohl ein quantitativer als auch qualitativer Vergleich der verschiedenen Klassierverfahren.

3.1 Siebklassierung

Siebanlagen sind die am häufigsten in der Aufbereitung von Gesteinskörnungen eingesetzten Klassierer [23]. Sie werden zur Klassierung von Massenströmen bei hohen Durchsatzraten, die 100 t/h meist übersteigen, eingesetzt. Durch die Verwendung mehrerer Siebebenen können Siebverfahren unabhängig von der Aufgabengröße des

Aufgabeguts eingesetzt werden. So können auch Partikelkollektive mit Körnungen $> 8 \text{ mm}$ klassiert werden. Der Trennschnitt lässt sich über die Maschenweite der verschiedenen Siebebenen einstellen.

Das Funktionsprinzip von Siebanlagen ist das Folgende: Zunächst wird ein Partikelkollektiv bzw. Siebgut auf ein Sieb aufgegeben. Ein Sieb ist mit Sieböffnungen, deren Größe der Trennkorngröße entspricht, versehen. Der Teil des Siebgutes, das Feingut, welches kleiner als die Sieböffnungen ist, fällt durch diese hindurch, wohingegen das Grobgut, welches größer als die Trennkorngröße ist, auf dem Sieb liegen bleibt. Blockieren grobe Körnungen diese Sieböffnungen, so ist dies nicht möglich. Je feiner die Trennkorngröße ist, umso wahrscheinlicher ist eine Blockade der Siebmaschen. Daher bedarf es einer Umlagerung der Körnungen durch zusätzliche Siebhilfen wie z. B. Luft- und Wasserstrahlen sowie durch mechanische Anregung wie Schwingung und Schlag. Ebenso ist für die Siebung von Feingut eine Vorklassierung notwendig, welche durch vorgeschaltete Siebebenen erfolgt. Die jeweiligen Siebverfahren unterscheiden sich nach der Art der Bewegung des Siebgutes auf dem Siebboden, nach dem Verwendungszweck sowie in Trocken- und Nasssiebung.

Der Großteil der Siebanlagen kann wirtschaftlich erst ab einer Trennkorngröße von 2 mm eingesetzt werden [24]. Allerdings gibt es einige Feinsiebanlagen, die zur Entfüllung von Gesteinskörnungen eingesetzt werden können. Bei der Siebung von feinen Körnungen ist eine Anregung der Siebebenen zur Vermeidung von Blockaden erforderlich. Hierzu haben sich insbesondere zwei Arten von Sieben durchgesetzt: die Hochfrequenzsiebe und die Spannwellensiebe.

Spannwellensiebe und Hochfrequenzsiebe sind ähnlich aufgebaut. Der Hauptunterschied besteht in der Schwingungsanregung der Siebdecks. Während die Schwingungen bei Hochfrequenzsieben durch Schlagleisten, die unter den jeweiligen Siebdecks angebracht sind, angeregt wird, erfolgt die Schwingungsanregung bei Spannwellensieben durch den Siebkasten. Bei beiden Siebverfahren bestehen die Siebebenen aus mehreren hintereinander angeordneten Siebfeldern. Diese Siebfelder sind längsgespannt angeordnet und unterschiedlich geneigt. Die Siebdeckmodule sind durch einen Siebkasten gekapselt, um ein Ausstauben zu verhindern. Während der Entfüllung wird das Feingut aus den jeweiligen Siebebenen abgezogen. Hierdurch entsteht ein Unterdruck, welcher das Material nah an die Sieboberflächen drückt. Dies bewirkt eine

Erhöhung der Siebdurchgänge [25] [26]. Der Aufbau eines Hochfrequenzsiebs ist beispielhaft in Abbildung 5 dargestellt:

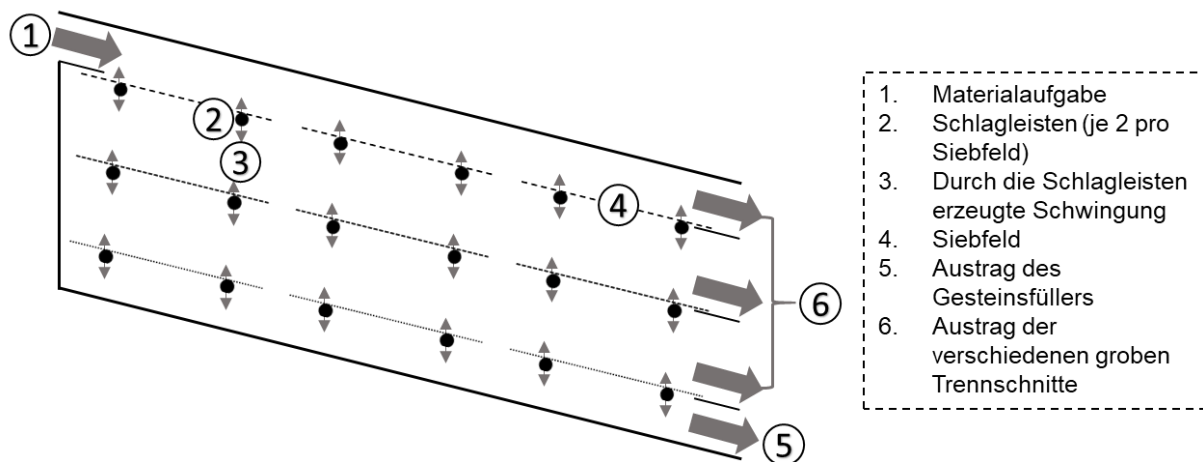


Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines Hochfrequenzsiebs gemäß der dreieckigen FINE-LINE Siebmaschine der Firma Haver & Böcker [25]

Der Energiebedarf von Feinsiebanlagen ist allerdings relativ hoch. Die *FINE-LINE* Siebmaschine der Firma *Haver & Böcker* benötigt z. B. 0,5 kWh pro t an Aufgabematerial. Dabei können bis zu 150 t/h durchgesetzt werden. Dafür weist diese Siebanlage eine vergleichsweise geringe Bauhöhe auf.

Allerdings weisen Siebanlagen auch einige Nachteile auf. Diese sind ein hoher Platzbedarf, besonders in der Fläche, hohe Investitionskosten und eine Verschleißanfälligkeit der Siebbeläge. Diese müssen regelmäßig gewechselt werden, was in temporären Stillständen des Betriebes resultiert. Um eine Staubbelastung am Arbeitsplatz zu vermeiden, müssen Siebanlagen eingekapselt werden, was die Wartung verkompliziert. Des Weiteren sind Siebanlagen im Trockenverfahren zur Klassierung von feuchtem oder klebrigem Material ungeeignet [25].

Bedingt durch die hohen Konstruktions-, Investitions- sowie Wartungskosten, dem vergleichsweise hohen Platzbedarf und dem auf hohe Durchsatzraten begrenzten Einsatzspektrum, sind Siebanlagen nur bedingt für die Entfüllung von Gesteinskörnungen geeignet. Für den Einsatz zur unproblematischen Nachrüstung bestehender Aufbereitungskonzepte sind Siebanlagen ungeeignet.

3.2 Hydroklassierung

Die Hydroklassierung und die Aeroklassierung sind der Strömungsklassierung zuzuordnen. Bei dieser erfolgt eine Trennung der Korngemenge durch unterschiedliche, partikelgrößenabhängige Sinkgeschwindigkeiten unter Wirkung von Feld- (Schwerkraft, Zentrifugalkraft oder Trägheitskraft) und Strömungskräften. Über die räumliche Konzeptionierung des Sichters und die Art und Stärke der Kräfte kann eine Trennung nach einer bestimmten Trennkorngröße erfolgen. Der maßgebliche technische Unterschied zwischen Aero- und Hydroklassierern ist die Wahl des Fluids (Luft oder Wasser). Wasser verfügt im Vergleich zu Luft über eine höhere Dichte und Viskosität. Deshalb ist die Strömungswiderstandskraft höher, und es treten geringere Sinkgeschwindigkeiten als bei Aeroklassierern auf. Das bedeutet, dass geringere Fluidvolumen benötigt werden. Die Produkte der Klassierung werden als Klassiergrobgut und Klassierfeingut bezeichnet.

Die Hydroklassierung setzt sich heutzutage in der Aufbereitung von Baurohstoffen immer stärker durch [27]. Bei der Entfüllung von Gesteinskörnungen finden Verfahren wie Nasswäscher und Hydrozyklone einen Einsatz.

Nasswäscher

Nasswäscher werden für Trennschnitte zwischen 20 µm und 63 µm eingesetzt. Dabei sind Durchsätze von über 500 t/h möglich und das Aufgabegut darf Korngrößen bis zu 32 mm aufweisen. Nasswäscher sind unterschiedlich aufgebaut, weisen in der Regel aber drei Komponenten auf. Die erste Komponente dient dazu, das Aufgabegut zu durchmischen und in eine Suspension mit Wasser zu bringen. Anschließend erfolgt eine Vorklassierung, z. B. durch eine Nasssiebung. Das Feingut wird darauffolgend in einem Hydrozyklon erneut klassiert, so dass die Feianteile abgeschieden werden können. Abschließend wird das Klassiergut entwässert [28] [29].

Bei Nasswäschern gelangt das Aufgabegut zunächst in einen Vorwaschkanal, in welchem es durchmischt und gewaschen wird. Anschließend gelangt das Schüttgut zur ersten Entwässerungsmaschine. Dort erfolgt eine Entwässerung, bei der das Feingut mitsamt dem Fluid abgeführt und gesammelt wird. Das entwässerte Grobgut wird über ein Förderband abgeführt. Das Feingut wird anschließend mit einer Pumpe in einen

Hydrozyklon gepumpt, der dieses klassiert und Feinstanteile abscheidet. Das klassierte Feingut wird anschließend durch den Unterlauf des Zyklons abgeschieden und über eine zweite Entwässerungsmaschine entwässert [28] [29].

Hydrozyklone

Hydrozyklone weisen dasselbe Funktionsprinzip wie Gaszyklone auf. Allerdings unterscheiden sich diese Anlagen in der Wahl des Fluids. Zyklone werden vorwiegend für feine Trennschnitte eingesetzt und weisen dabei ein weites Einsatzspektrum auf. So gibt es sowohl Anlagen, die weniger als 1 t/h klassieren, als auch Anlagen die bis zu 1000 t/h durchsetzen. Der typische Aufbau eines Zyklons ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt:

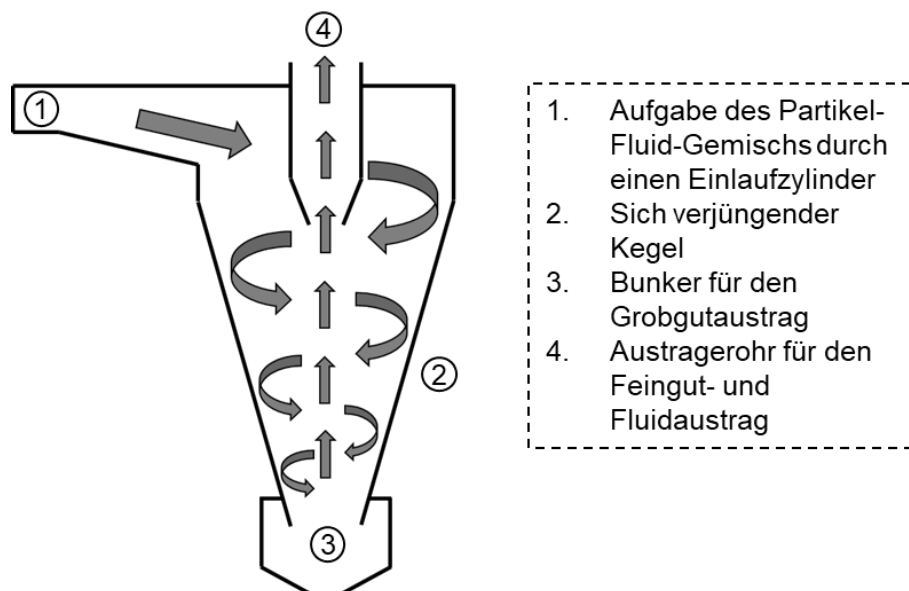


Abbildung 6: Prinzipskizze eines Zyklons gemäß Rippert Anlagentechnik GmbH [30]

Über einen Einlaufzylinder (1) wird ein Partikel-Fluid-Gemisch in den Zyklon eingeführt. Dieses wird tangential in einer kreisförmigen Bahn in einen sich verjüngenden Kegel (2) geleitet. Durch die Verjüngung, den mit abnehmender Höhe abnehmenden Radius des Kegels, erhöht sich gemäß dem Kontinuitätsprinzip die Drehgeschwindigkeit und Fliehkräfte nehmen zu. Diese Fliehkräfte drücken grobe Partikel an den Rand des Kegels. Von dort fallen diese nach unten und werden in einem Bunker (3) ausgelesen. Am unteren Ende des Kegels kommt es zu einer Umkehrung der Strömung. Diese ist im Zentrum des Kegels nach oben gerichtet und wird am oberen Ende des Kegels über ein Austragerrohr (4) gemeinsam mit den feinsten Partikeln ausgetragen.

Das Austragerrohr ist mit einem spiralförmigen Profil versehen, welches zum spiralförmigen Strömungsverlauf beiträgt.

Zusammenfassung der Hydroklassierung

Einer der größten Nachteile der Klassierung im Trockenverfahren, der Sieb- und der Aeroklassierung, ist die Anfälligkeit gegenüber Feuchtigkeit. Ist das Aufgabematerial feucht oder klebrig, so kann im Trockenverfahren das Feingut nicht vom Grobgut gelöst werden – eine effektive Dispergierung ist nicht möglich. Bei Hydroklassierern tritt dieser Nachteil nicht auf. Durch die Verwendung von Wasser als Strömungsfluid kann das Aufgabegut einfacher dispergiert und desagglomeriert werden. Ein weiterer Vorteil von Wasser als Strömungsfluid ist die höhere Dichte und Viskosität. Infolge dieser nehmen die Auftriebskraft und die Strömungswiderstandskraft zu. So lassen sich geringere Sinkgeschwindigkeiten realisieren und ein geringeres Fluidvolumen als bei der Aeroklassierung wird benötigt. Dadurch sind geringere Baugrößen und eine höhere Energieeffizienz möglich.

Wie bei Siebanlagen können mit Hydroklassierern auch sehr grobe Körnungen mit einem Durchmesser von bis zu 32 mm klassiert werden. Hydroklassierer sind verschleißärmer als Siebanlagen, bei welchen die Siebbeläge sehr verschleißanfällig sind. Sie benötigen allerdings, aufgrund der Verwendung von Wasser, einen Korrosionsschutz. Hydroklassierer sind sehr trennscharf und ermöglichen eine Reduzierung des Fülleranteils auf annähernd 0 %. Dies ist allerdings nicht nur vorteilhaft, da für einige Verwendungszwecke von Gesteinskörnungen ein gewisser Fülleranteil gefordert ist. Ein erheblicher Nachteil von Hydroklassierern ist, dass diese aufwendige Genehmigungsverfahren bedingen. Ebenso ist das Abscheiden des Feinguts aus dem Fluid nicht ohne weiteres möglich. Hierfür sind weitere Klassierer, wie Hydrozyklone, Filterpressen oder Absetzbecken erforderlich. Ein weiterer Nachteil von Hydroklassierern ist, dass die Körnungen nach der Klassierung in einem weiteren Prozessschritt getrocknet werden müssen. Da nur ca. 90 % des Fluids im Kreislauf geführt werden kann bedingen Hydroklassierer eine externe Wasserversorgung. Diese lässt sich bei der Nachrüstung bestehender Aufbereitungsanlagen meist nicht ohne weiteres realisieren. Aufgrund aufwendiger Genehmigungsverfahren, komplexer Feingutabscheidung und ihrem Wasserbedarf sind Hydroklassierer zur Nachrüstung ungeeignet.

3.3 Aeroklassierung

Im Gegenzug zu Sieb- und Hydroklassierern sind einige Windsichter prinzipiell zur Nachrüstung bestehender Aufbereitungsanlagen geeignet. Daher, in Anlehnung an die Zielsetzung dieser Arbeit, wird die Windsichtung ausführlicher als die Sieb- oder die Hydroklassierung beschrieben.

Die Aeroklassierung bzw. Windsichtung findet ihre Anwendung vornehmlich bei Trennkorngrößen von 1 μm bis 100 μm und wird in der Regel bis zu Aufgabekorngrößen von maximal 2 mm eingesetzt. Bei der Aeroklassierung werden trockene, feindisperse Partikelkollektive in einem gasförmigen Medium klassiert. Die im Trennraum des Sichters angreifenden, partikelgrößenabhängigen Strömungskräfte und partikelgrößenunabhängigen Feldkräfte resultieren in unterschiedlichen Bewegungsrichtungen, Sinkgeschwindigkeiten und Bahnkurven in Abhängigkeit von der Partikelgröße. Über die Geometrie bzw. räumliche Dimensionierung des Trennraums wird eine Trennung in eine Fein- und Grobfraction gewährleistet. Dabei wird die Feinfraction mit dem Trägermedium ausgetragen und in einem Feinkornabscheider voneinander getrennt, wohingegen die Grobfraction separat ausgetragen wird. Die prinzipielle Funktionsweise von Windsichtern bzw. Aeroklassierern gleicht dabei der Funktionsweise von Hydroklassierern – lediglich das verwendete Fluid ist unterschiedlich.

Die Trennschärfe hängt bei der Aeroklassierung weitestgehend von dem als Gutbeladung bezeichneten Feststoff-Fluid-Verhältnis im Klassierraum ab. Daher muss bei der Dimensionierung eines Windsichters ein Ausgleich zwischen dem gewünschten Durchsatz und der Trennschärfe geschaffen werden. Zur Auswahl einer optimalen Gutbeladung müssen die Trenngrenze, die räumliche Dimensionierung des Klassierraums sowie das Verhältnis von Strömungs- und Sinkgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Bei einer optimalen Auslegung der Sichtereinstellungen hängt der Durchsatz lediglich von der Größe des Strömungsquerschnitts ab [31].

Die Verfahren zur Aeroklassierung werden nach der Art der Kraftwirkung und nach der Art der Strömungsfelder unterschieden. Die Kraftwirkung kann entweder durch Schwerkraft oder durch Zentrifugalkraft erfolgen. Die Art der Strömungsfelder ist entweder einachsig (Steig-, Horizontal-, Querstromsichter), zweiachsig (Spiralsichter), dreiachsig (Streutellersichter, Zyklone) oder unregelmäßig (Vibrosichter). Des Weiteren

ren werden Siebter vereinfacht nach der Bewegungsrichtung des Grobgutes in Relation zur Hauptströmungsrichtung in Quer- und Gegenstromsiebter unterschieden [24] [22]. Eine schematische Einteilung der Siebtertechniken in Relation zur Strömungsrichtung und zur Kraftwirkung ist in Tabelle 3 dargestellt:

	Gegenstrom	Querstrom
Schwerkraft	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zick-Zack-Siebter ▪ Steigrohrsiebter ▪ Gegenstrom-Umlenksiebter 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Horizontalsiebter ▪ Querstrom-Umlenksiebter
Zentrifugalkraft	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Spiralwindsiebter ▪ Abweiseradsiebter 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Streutellersiebter

Tabelle 3: Einteilung der Windsiebter [32]

Neben der Kraftwirkung und der Strömungsrichtung können Windsiebter auch gemäß der Luftführung in Durchfluß- und Umluftsiebter aufgeteilt werden. Bei einem Durchflußsiebter wird das Aufgabegut in Richtung oder entgegen der Richtung der zugegebenen Luft geführt. Dadurch ist eine stetige Dispergierung des Aufgabegutes durch die Luftströmung sowie eine Kühlung und eine Trocknung feuchter Bestandteile möglich. Bei einem Umluftsiebter wird ein Luftstrom innerhalb des Klassierraums erzeugt und in einem Kreislauf geführt. Dies erleichtert eine Feingutabscheidung. Bei Umluftsiebtern kann es zu einer verringerten Trennschärfe kommen, wenn feinste Partikel im Luftstrom verweilen und es so zu einem Anstieg der Gutbeladung kommt [33].

Im Folgenden werden die für die Klassierung von Gesteinskrönungen relevanten Verfahren zur Aeroklassierung gemäß ihrer Funktionsweise vorgestellt. Dabei erfolgt eine Unterteilung der Verfahren in Querstrom- und Gegenstromsiebter.

Querstrom-Schwerkraftsiebter

Querstrom-Schwerkraftsiebter werden meist zur Klassierung sehr feiner Partikelkollektive und bei kleinen Massenströmen eingesetzt. Ein Einsatz zur Entfüllung von Gesteinskrönungen ist prinzipiell möglich, spielt in der Industrie aber eher eine untergeordnete Rolle. Da die in dieser Arbeit vorgestellte Neuentwicklung auf dem Funktionsprinzip eines Querstrom-Schwerkraftsiebters beruht, wird die Funktionsweise solcher Anlagen im Folgenden anhand einer Prinzipskizze (Abbildung 7) erläutert:

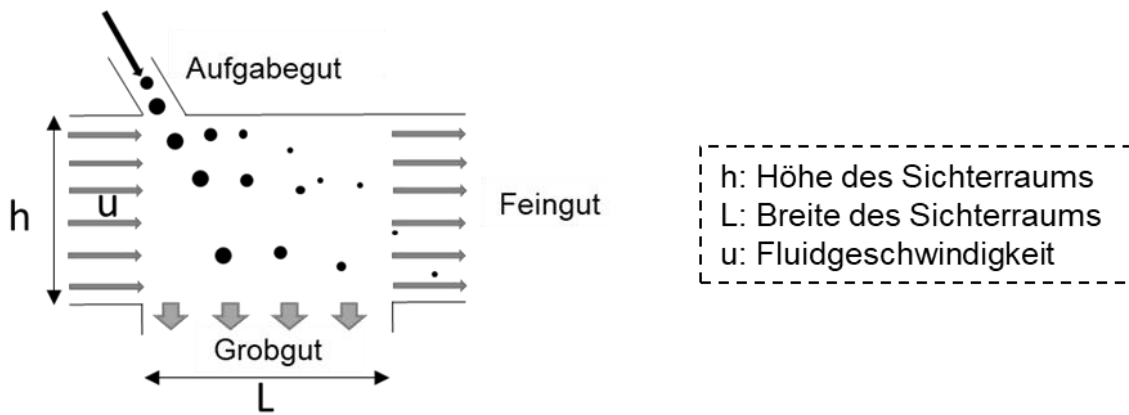


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Wirkprinzips eines Querstrom-Schwerkraftsichters [31]

Bei Querstrom-Schwerkraftsichtern erfolgt die Materialaufgabe über eine geneigte Aufgabeeinheit von oben. Durch die Neigung wird eine horizontale Bewegungskomponente der Partikel gewährleistet. Im Klassierraum wird das Aufgabegut von einer horizontalen, laminaren Luftströmung erfasst. Je nach Größe der Partikel haben diese unterschiedliche Sinkgeschwindigkeiten und weisen damit unterschiedliche Flugbahnen auf. Dabei nimmt die effektive horizontale Bewegungskomponente mit zunehmender Partikelgröße bzw. Sinkgeschwindigkeit ab. Dies ermöglicht eine Fraktionierung der Partikel nach der Größe innerhalb des Sichters. Das Feingut wird dabei mit dem Luftstrom am Ende des Sichterraums ausgetragen. Ein Vorteil von Querstrom-Schwerkraftsichtern ist, dass mit diesen eine Fraktionierung des Klassierguts in mehrere Teilfraktionen möglich ist [31]. Allerdings sind diese Sichter für die Desagglomeration des Aufgabeguts ungeeignet [34].

Für die Klassierung ist die Dimensionierung des Sichterraums von Bedeutung. Dabei ist h die Höhe des Sichterraums, L die Breite des Sichterraums und u ist die Fluidgeschwindigkeit. Die Partikel bewegen sich mit einer Sinkgeschwindigkeit v . Die Trennkorngröße d ist proportional zur kritischen Sinkgeschwindigkeit v_{krit} . Partikel mit einer größeren Sinkgeschwindigkeit, welche mit einer größeren Korngröße einhergeht, werden als Grobgut ausgetragen, feinerer Partikel mit niedrigeren Sinkgeschwindigkeiten als Feingut. Die Beziehung zwischen der Sichtergeometrie und der Partikel- und Fluidgeschwindigkeit ist die Folgende [22]:

$$\frac{L}{u} = \frac{h}{v_{krit}} \quad (1)$$

Diese Gleichung besagt, dass bei der kritischen Sinkgeschwindigkeit, welcher die Trennkorngröße zuzuordnen ist, die Fallzeit in horizontaler Richtung der Fallzeit in vertikaler Richtung entspricht. D. h., dass die Partikelbahnen genau zwischen dem Grobgut- und Feingutaustrag enden. Nach diesem Prinzip funktionieren alle Querstromsichter.

Querstrom-Zentrifugalkraftsichter

Der Großteil der Querstrom-Zentrifugalkraftsichter wird zur Klassierung von Feinstkorn bei Trenngrenzen zwischen 1 μm und 50 μm und sehr geringen Durchsätzen eingesetzt. Allerdings gibt es auch einige Anlagen, die eine Anwendung bei der Entfüllung von Gesteinskörnungen finden. Dies sind insbesondere Gaszyklone als Umluftsichter und Streusichter als Durchflußsichter. Im Folgenden wird die Funktionsweise dieser Sichter erläutert:

Gaszyklone

Gaszyklone funktionieren nach demselben Funktionsprinzip wie Hydrozyklone, welches in Kapitel 3.2 erläutert worden ist. Dabei unterscheiden sich lediglich die Wahl des Fluids und dessen Umströmungseigenschaften. Gaszyklone werden speziell zur Staubabscheidung bei der Entfüllung eingesetzt. Sie sind oft Sieben oder anderen Entfüllungsanlagen nachgeschaltet, um Feinstkorn aus einem Partikel-Gas-Gemisch abzuscheiden. Je nach Anlagengröße sind Durchsätze von mehreren Hundert Tonnen pro Stunde möglich. Die Trennkorngröße kann dabei über die Strömungsgeschwindigkeit variiert werden [30] [31] [34].

Streusichter

Streusichter werden u. a. zur Entfüllung von Gesteinskörnungen in der Zementindustrie eingesetzt. Sie sind oft für hohe Durchsätze ausgelegt und weisen große Bauweisen und einen hohen Fluidbedarf auf. Die Funktionsweise von Streusichtern wird im Folgenden anhand eines Sichters der Firma *CMP AG* erläutert. Dieser wird für Durchsätze von bis zu 200 t/h eingesetzt und weist dabei eine Bauhöhe von 8,8 m und ein Bauvolumen von über 400 m³ auf. Für die Klassierung mit diesem Sichter werden bis zu 300.000 m³ Luft pro Stunde benötigt. Dieser Sichter ist schematisch in Abbildung 8 dargestellt:

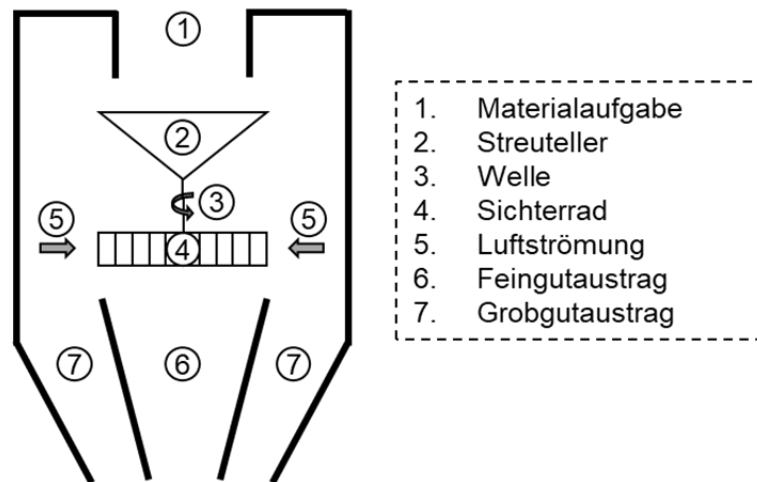


Abbildung 8: Prinzipskizze: Querstrom-Windsichter zur Entfüllung gemäß der CMP AG [35]

Bei einem Streusichter wird das Aufgabegut (1) von oben über einen Fallschacht auf einen rotierenden Streuteller (2) aufgegeben, welcher sich im Zentrum des zylinderförmigen Sichters befindet. Der Streuteller dispergiert die Partikelkollektive und schleudert diese gleichmäßig und quer zur Fluidströmung nach außen in die Trennzone, von wo diese nach unten fallen. Unter dem Streuteller befindet sich das Sicherterrad (4), welches durch eine Welle (3) in Rotation versetzt wird. Durch die Rotation des Sicherterrads wird eine nach innen gerichtete Strömung (5) erzeugt, welche quer zur Fallrichtung der Partikel verläuft. Feine Partikel werden von dieser Strömung erfasst und in Richtung des Zentrums des Klassierers geleitet. Von dort fallen sie nach unten und können ausgetragen werden (6). Das Feingut muss anschließend über Filter oder einen Zyklon aus dem Partikel-Gas-Gemisch abgeschieden werden. Die groben Partikel hingegen, verweilen am Rand des Sichters und werden dort ausgetragen (7). Der Trennschnitt ist über die Drehzahl der rotierenden Welle variabel bis minimal $1\ \mu\text{m}$ einstellbar. Allerdings können in diesem Sichter keine Körnungen, die größer als $1\ \text{mm}$ sind, aufgegeben werden [35].

Neben einem einfach regelbaren Trennschnitt zeichnen sich Streusichter durch eine hohe Verfügbarkeit, geringen Verschleiß und geringe Betriebskosten aus. Allerdings weisen Streusichter eine sehr große Bauweise auf und können nur bei trockenem Gut, welches kleiner als $1\ \text{mm}$ ist, eingesetzt werden [35]. Das bedeutet, dass diesen Sichter oft weitere Klassierstufen vorgeschaltet werden müssen. Insofern eignen sich solche Sichter kaum zur Nachrüstung bestehender Aufbereitungsanlagen.

Gegenstrom–Schwerkraftsichter

Gegenstrom- Schwerkraftsichter werden ebenfalls meist zur Klassierung von Feinstgut bei geringen Durchsätzen eingesetzt. Allerdings gibt es auch Adaptionen dieses Sichters, welche für größere Durchsätze konzeptioniert sind und in der Entfüllung eingesetzt werden. Dieser Abschnitt stellt zunächst das generelle Funktionsprinzip von Gegenstromsichtern anhand eines Gegenstrom-Schwerkraftsichters vor. Anschließend werden zwei zur Entfüllung von Gesteinskörnung genutzte Varianten von Gegenstrom-Schwerkraftsichtern beschrieben. Abbildung 9 stellt den generellen Aufbau eines Gegenstrom- Schwerkraftsichters schematisch dar:

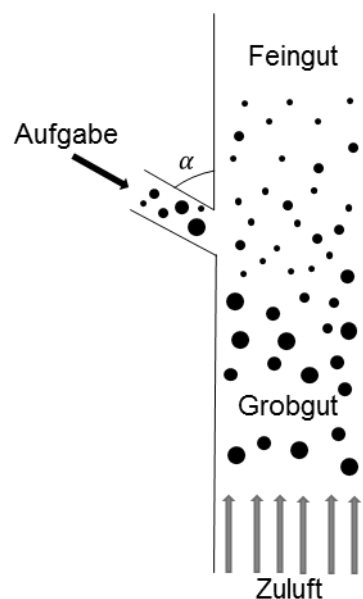


Abbildung 9: Gegenstrom-Schwerkraftsichter [36]

Bei Gegenstrom- Schwerkraftsichtern wird das Aufgabegut kontinuierlich in einen vertikalen, quader- oder zylinderförmigen Klassierraum aufgegeben. Dieser wird von einer laminaren Strömung von unten nach oben durchströmt. Diese Strömung ist entgegen der Schwerkraft gerichtet. Die Trennung erfolgt anhand der Sinkgeschwindigkeit der Partikel. Ist diese größer als die Strömungsgeschwindigkeit, was bei groben Partikeln der Fall ist, so erfolgt ein Austrag am unteren Ende des Klassierraums. Ist die Sinkgeschwindigkeit kleiner, so werden die Partikel mit der Strömungsgeschwindigkeit am oberen Ende des Klassierraums ausgetragen. In der Trennzone gleicht die Sinkgeschwindigkeit des Trennkorns der Strömungsgeschwindigkeit. Die Trenngrenze lässt sich folglich über die Strömungsgeschwindigkeit einstellen. Hierbei tritt allerdings ein Problem des Gegenstrom- Schwerkraftsichters auf. Da die Strömungsgeschwindigkeit

der Sinkgeschwindigkeit des Trennkorns gleicht, kommt keine effektive Partikelbewegung zustande und die Partikel reichern sich in der Trennzone an. Damit reduziert sich die Trennschärfe des Sichters. Insofern können diese Sichter nur für geringe Durchsätze, welche deutlich geringer als bei Querstrom-Schwerkraftsichtern sind, eingesetzt werden. Ein weiterer Nachteil von Gegenstrom-Schwerkraftsichtern ist, dass ebenfalls kein konstantes Strömungsprofil gewährleistet werden kann, da es an den Randbereichen des Klassierraums zu einer Verlangsamung der Strömung aufgrund von Reibung kommt. Des Weiteren ist mit diesen Sichtern keine auffächernde Klassierung, d.h. eine Klassierung mit mehreren Trennschnitten, möglich [36].

Gegenstrom-Schwerkraftsichter zur Entfüllerung

Die Firma *IKW Industrieanlagenbau GmbH* hat einen Gegenstrom-Schwerkraft-Windsichter speziell für die Entfüllerung von Gesteinskörnungen entwickelt. Dieser ist schematisch in Abbildung 10 dargestellt:

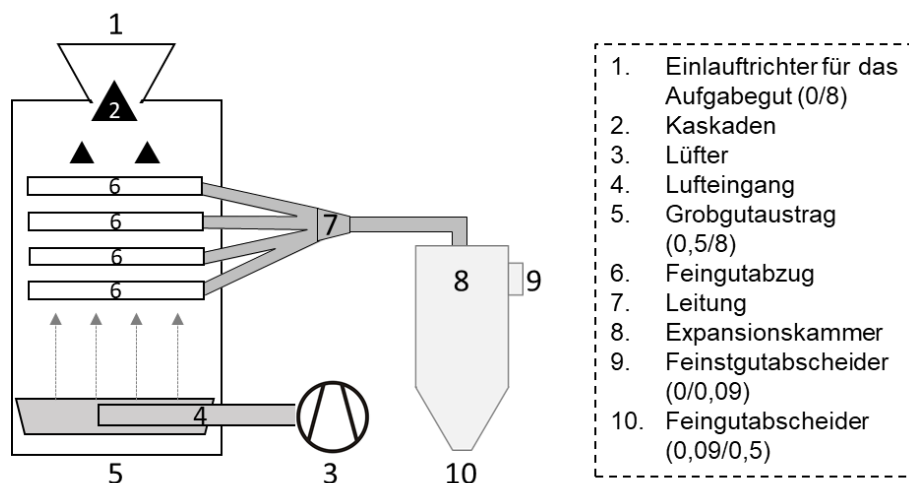


Abbildung 10: Prinzipskizze: Gegenstrom-Schwerkraftsichter zur Entfüllerung gemäß der IKW Industrieanlagenbau GmbH [37].

Das Aufgabegut (1), welches ein Kornspektrum von 0 bis 8 mm abdecken kann, wird über eine Bandanlage in den Einlauftrichter der Anlage aufgegeben. Von diesem fällt es auf Formwiderstände (Kaskaden) (2), welche eine Auffächerung (Dispergierung) des Gutes bewirken. Das Aufgabegut wird anschließend von einem Luftstrom mit hohem Druck, der entgegen der Fallrichtung gerichtet ist, erfasst. Dieser wird am unteren Ende durch einen Lüfter erzeugt (3) und in die Anlage geleitet (4). Der Luftstrom befördert feine Körnungen ($< 0,5$ mm) in den Feingutabzug (6) an den Seiten des Klassierers. Das Grobgut hingegen fällt herunter und wird unter dem Sichter ausgetragen.

Das Feingut wird anschließend über eine Leitung (7) zu einer Expansionskammer (8), die als Feinstgutabscheider dient, befördert. In dieser Expansionskammer wird die Strömungsgeschwindigkeit verringert, so dass lediglich die feinsten Körnungen (0-90 µm) in Schwebelage verweilen. Diese werden seitlich abgesaugt und ausgetragen (9). Die gröberen Körnungen werden am unteren Ende der Expansionskammer (10) ausgetragen [37]. Mit diesem Verfahren können hohe Durchsatzraten von bis zu 500 t/h erreicht werden. Dabei werden bis zu 88 % der Körnungen mit einer Korngröße von unter 100 µm entfernt [37].

Kaskadensichter

Eine weitere Variante des Gegenstrom-Schwerkraftsichters, die zur Entfällung von Schüttgütern eingesetzt wird, ist der Kaskadensichter. Das Funktionsprinzip von Kaskadensichtern wird am Beispiel einer Anlage der Firma *Scheuch GmbH* erläutert. Dazu ist der Kaskadensichter schematisch in Abbildung 11 dargestellt:

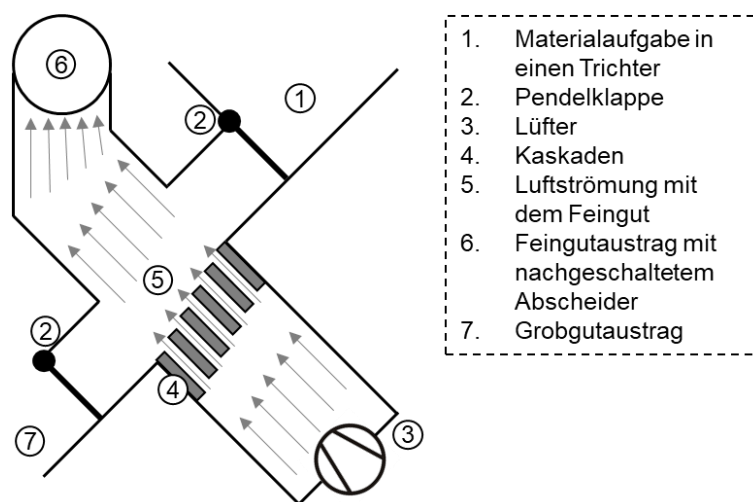


Abbildung 11: Prinzipskizze: Kaskadensichter zur Entfällung gemäß der Scheuch GmbH [9]

Das Aufgabegut wird von einer Bandanlage von oben über einen Trichter (1) in den Kaskadensichter aufgegeben. Von dort gelangt es über eine Pendelklappe (2) in den Klassierraum. Die Pendelklappen verhindern das Austreten von Leckluft bei der Materialaufgabe und bei dem Grobgutaustrag (7). Das Auftreten von Leckluft würde die Strömungsrichtung, die Turbulenz der Strömung und letztendlich die Trennschärfe des Klassierers negativ beeinflussen. Im Klassierraum fällt das Aufgabegut über Kaskaden (4) in Richtung des Grobgutaustrags (7). Hinter den Kaskaden, welche als Düsen dienen, ist ein Lüfter (3) installiert, welcher Luft von außen in den Klassierer bläst. Die

Luftströmung passiert die Kaskaden und löst das Feingut durch Scherkräfte vom Grobgut. Das Grobgut passiert eine weitere Pendelklappe (2) und wird unter dem Klassierer ausgetragen (7). Das Feingut wird mit der Strömung (5) nach oben durch eine Zellenradschleuse in eine Entstaubungsanlage befördert (6), wo es abgeschieden wird.

Kaskadensichter zeichnen sich in Relation zur Baugröße durch eine hohe Wirtschaftlichkeit aus. Mit einer einzelnen Anlage können bis zu 85 t/h durchgesetzt werden. Durch eine Parallelschaltung von Kaskadensichtern kann der Durchsatz gesteigert werden. Allerdings eignen sich Kaskadensichter nur zur Klassierung von trockenem Material. Der Feuchtigkeitsgehalt darf 1,5 % nicht übersteigen, da die Scherkräfte, die durch die Luftströmungen auftreten, ansonsten nicht ausreichen, um das Feingut vom Grobgut zu lösen. Daher sind Kaskadensichter anfällig gegenüber hoher Luftfeuchtigkeit. Neben dem Abscheren vom Feingut durch die Luftströmung erfolgt keine weitere Dispergierung in einem Kaskadensichter. Ebenso benötigen Kaskadensichter eine möglichst homogene Material- und Luftverteilung über die Gesamtbreite des Sichters, um das Aufgabegut effektiv zu klassieren [9]. Kaskadensichter sind aufgrund ihrer vergleichsweise niedrigen Bauweise zur Nachrüstung bestehender Aufbereitungsanlagen geeignet.

Gegenstrom–Zentrifugalkraftsichter

Gegenstrom–Zentrifugalkraftsichter eignen sich insbesondere für die Klassierung im Feinstkornbereich. Sie werden nach der Strömungsführung in Sichter mit einer freien Wirbelstromführung, wie z. B. Spiralwindsichter, und in Sichter mit einer gezwungenen Wirbelströmung wie z. B. Abweiseradsichter unterteilt [31] [38]. Dabei werden lediglich Abweiseradsichter zur Entfüllung eingesetzt.

Abweiseradsichter

Abweiseradsichter sind Sichter, die zur Trennung im Feinstkornbereich eingesetzt werden. Ein Anwendungsbereich von Abweiseradsichtern ist die Entfüllung in der Zementindustrie. Der Aufbau eines Abweiseradsichters ist schematisch in Abbildung 12 dargestellt:

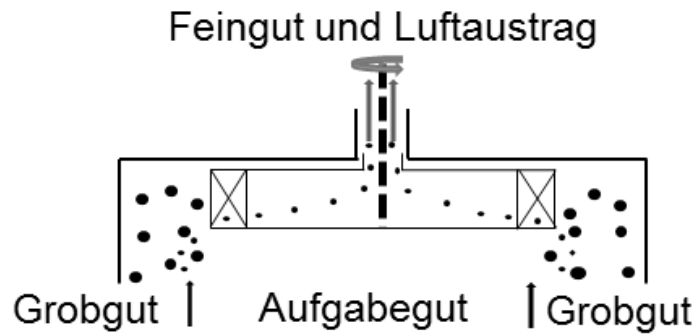


Abbildung 12: Abweiseradsichter [39]

Bei Abweiseradsichtern wird das Aufgabegut meist von unten, pneumatisch in einen zylinderförmigen Klassierraum aufgegeben, in welchem ein Rotor mit variabel einstellbaren, radial gerichteten Schaufeln rotiert. Dieser Rotor ist an einer Welle befestigt. Durch die Drehströmung, welche durch die Schaufeln erzeugt wird, werden die feinen Partikel nach innen eingesaugt und im Zentrum des Sickers nach oben ausgetragen. Das Grobgut wird am Rand des Sickers unter Wirkung der Schwerkraft ausgetragen [39]. Abweiseradsichter können sowohl bei geringen als auch bei sehr hohen Durchsätzen eingesetzt werden. Allerdings ist wie bei Streusichtern eine Vorklassierung der Partikel auf Korngrößen unter 1 mm erforderlich. Zudem weisen die in der Zementindustrie eingesetzten Abweiseradsichter meist sehr hohe Bauhöhen und einen vergleichsweise hohen Energiebedarf auf. Abweiseradsichter sind folglich zur Nachrüstung eher ungeeignet.

Zusammenfassung der Aeroklassierung

Windsichter zeichnen sich im Vergleich zu Sieb- und Strömungsklassierern durch geringe Wartungs- und Betriebskosten und eine hohe Verfügbarkeit aus. Dies liegt daran, dass Windsichter weniger verschleißanfällig als Siebanlagen sind und keine externe Wasserversorgung benötigen. Des Weiteren lassen sich Windsichter sowohl für sehr geringe, als auch für hohe Durchsatzraten einsetzen und weisen einen variablen Trennschnitt auf. Allerdings sind die Baugröße und der Energiebedarf von Windsichtern, insbesondere bei hohen Durchsätzen, tendenziell größer als bei anderen Klassierern. Ein weiterer Nachteil ist der hohe Anspruch an das Aufgabegut: Dieses darf meist eine Größe von 1 mm bis 2 mm nicht überschreiten und darf weder klebrig noch feucht sein. Die Dispergierung bei der Windsichtung erfolgt über Formwiderstände wie z. B. Kaskaden, Zentrifugalkräfte unter der Verwendung von Drehtellern und über

durch Luftdüsen erzeugte Scherkräfte. Dabei treten eher geringe Kräfte auf, die oft nicht ausreichen, um die Körnungen bei einer erhöhten Feuchtigkeit zu dispergieren und Agglomerate zu lösen.

Der Großteil der Aeroklassierer wird zur Trennung von Feinstkorn bei geringen Durchsätzen eingesetzt. Dazu gehören Zyklonumluftsichter, Zickzacksichter, Gegenstrom-Umluftsichter, Spiralwindsichter und einige Abweiseradsichter. Diese Klassierer sind eher zur Klassierung von sehr feinen, wenige Mikrometer kleinen Partikeln z. B. in der Chemie oder Pharmazie geeignet und werden nicht zur Entfüllung eingesetzt [40]. Bei der Entfüllung von Gesteinskörnungen finden maßgeblich Gaszyklone, Streusichter, Gegenstrom-Schwerkraftsichter, Kaskadensichter und Abweiseradsichter eine Anwendung.

Zentrifugalkraftsichter wie Streusichter und Abweiseradsichter werden in der Zementindustrie bei hohen Durchsätzen eingesetzt. Sie weisen sehr große Bauweisen auf und bedingen eine Vorklassierung der Partikel auf eine Korngröße von weniger als 1 mm. Gaszyklone hingegen werden maßgeblich zur Feingutabscheidung in Kombination mit anderen Klassierern eingesetzt. Aufgrund ihrer großen Bauweise sind Zentrifugalkraftsichter nicht zur Nachrüstung geeignet.

Schwerkraftsichter wie Gegenstrom-Schwerkraftsichter und Kaskadensichter eignen sich zur Entfüllung von Gesteinskörnungen bei mittleren bis hohen Durchsätzen. Sie weisen tendenziell eine etwas geringere Trennschärfe als Zentrifugalkraftsichter auf [49]. Insbesondere Kaskadensichter sind aufgrund ihrer niedrigen Bauweise zur Nachrüstung geeignet.

Windsichter reduzieren den Fülleranteil in der Regel auf zwischen 2 % und 4 %. Eine Reduzierung unter 1,5 % ist aufgrund des Haftkornanteils oft nicht möglich. Gerade bei feuchtem Material kann oft nur eine Reduzierung des Fülleranteils auf ca. 5 % gewährleistet werden. Generell gilt für die Steine- und Erden-Industrie, dass ein möglichst geringer Fülleranteil angestrebt ist, der in jedem Fall unter 10 % liegt. Hierbei ist insbesondere von Bedeutung, dass die Aufbereitungsanlagen Korngemische mit vergleichbaren Fülleranteilen produzieren, da die Asphaltmischanlagen vergleichbare Korngemische benötigen.

3.4 Zusammenfassung des Stands der Technik

Im Stand der Technik zur Entfüllung von Schüttgütern finden verschiedene Verfahren Anwendung. Diese lassen sich in Siebanlagen, Aeroklassierer und Hydroklassierer unterteilen. Die unterschiedlichen Verfahren sind quantitativ und qualitativ miteinander verglichen worden.

Für den quantitativen Vergleich sind über 300 Anlagendaten verschiedener Hersteller und Anlagentypen miteinander verglichen worden. Die betrachteten Klassierer setzen sich aus Nass- und Trockensiebverfahren, Abweiserad- und Kaskadenwindsichter sowie Hydrozyklonen und Nasswäschern zusammen. Die Anlagen sind mit einer Trennkorngröße zwischen 50 μm und 100 μm für die Entfüllung geeignet. Das Ziel dieser Analyse ist es, die Bauhöhen, das Bauvolumen und den Energieverbrauch in Bezug zum Durchsatz der Anlagen zu setzen. Somit ist ein direkter Vergleich der Anlagentypen möglich. Ebenfalls kann die Neuentwicklung, welche in dieser Arbeit vorgestellt wird, direkt mit dem Stand der Technik verglichen und bewertet werden. Diese Datenanalyse ist im Anhang: „Anhang 8: Quantitative Analyse des Stands der Technik“ ausführlich beschrieben worden und wird zur Bewertung der technisch- wirtschaftlichen Eignung der Neuentwicklung in Kapitel 7 aufgegriffen. Die Ergebnisse der Datenanalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die höchste Effizienz bei der Energie- und Raumnutzung lässt sich den Siebanlagen zuschreiben. Diese können allerdings erst ab einem Durchsatz von über 50 t pro Stunde eingesetzt werden. Die Nass-Siebung ist dabei effektiver als die Trocken-Siebung. In Bezug auf die Baugröße ähneln sich Hydroklassierer und Windsichter. Hydroklassierer weisen allerdings eine höhere Energieeffizienz auf. Als ein besonders niedrigbauender Anlagentyp zeichnen sich Kaskadensichter aus – diese weisen allerdings eine geringere Energieeffizienz als andere Anlagen auf [41].

Der qualitative Vergleich der verschiedenen Klassierer umfasst die Anforderungen an das Aufgabegut, die Trennschärfe und die Notwendigkeit nachgeschalteter Prozessschritte. Der Vergleich ist in Tabelle 4 dargestellt:

	Siebverfahren	Aeroklassierer	Hydroklassierer
<i>Anforderungen an das Aufgabegut</i>			
Zulässige Korngröße	bis zu 32 mm	bis zu 1 - 2 mm	bis zu 32 mm
Zulässige Feuchtigkeit	bis 1,5 %	bis 1,5 %	-
<i>Eigenschaften der Anlagen</i>			
Strömungsfluid	-	Luft	Wasser
Verschleiß / Korrosion	verschleißanfällig	bei abrasivem Material verschleißanfällig	korrosionsanfällig
Trennschärfe	sehr hoch	hoch	am höchsten
Fehlkornanteil	-	bis zu 3 %	-
Nachrüstbarkeit	-	teilweise gegeben	
<i>Vor- bzw. nachgeschaltete Prozesse</i>			
Vorgeschaltete Prozesse	-	Vorklassierung	-
Nachgeschaltete Prozesse	-	-	Trocknung
<i>Quantitativer Vergleich</i>			
Durchsätze	hoch	gering bis hoch	mittel bis hoch
Energieverbrauch	am geringsten	am höchsten	mittel
Baugröße	am geringsten	am höchsten	mittel

Tabelle 4: Qualitativer Vergleich des Stands der Technik

Siebverfahren werden zur Klassierung von hohen Massenströmen eingesetzt. Durch die Verwendung mehrerer Siebebenen können Siebverfahren unabhängig von der Aufgabegröße des Gutes eingesetzt werden. So können auch Partikelkollektive mit Körnungen > 8 mm klassiert werden. Siebanlagen weisen bei hohen Durchsatzraten eine verhältnismäßig geringe Bauhöhe und eine hohe Energieeffizienz auf. Der wesentliche Nachteil von Siebanlagen ist die Verschleißanfälligkeit der Siebbeläge. Diese müssen regelmäßig gewechselt werden, was in temporären Stillständen des Betriebes resultiert. Um eine Staubbelastung am Arbeitsplatz zu vermeiden, müssen Siebanlagen eingekapselt werden, was die Wartung verkompliziert. Da sich Siebanlagen primär für hohe Durchsatzraten eignen und eine komplexe Bauweise aufweisen, sind diese für die Nachrüstung ungeeignet [23].

Mit Hydroklassierern können sehr grobe (bis zu einem Durchmesser von 32 mm) und auch feuchte sowie bindige Körnungen klassiert werden. Hydroklassierer sind verschleißärmer als Siebanlagen. Sie benötigen allerdings, aufgrund der Verwendung von Wasser, einen Korrosionsschutz. Hydroklassierer sind sehr trennscharf und ermöglichen eine Reduzierung des Fülleranteils auf 0 %. Dies ist allerdings nicht nur vorteilhaft, da für einige Verwendungszwecke von Gesteinskörnungen ein gewisser Fülleranteil gefordert ist. Des Weiteren ist eine externe Wasserversorgung notwendig und

die Körnungen müssen nach der Klassierung in einem weiteren Prozessschritt getrocknet werden [27]. Neben der Trocknung stellt auch die Feingutabscheidung aus dem Fluid ein Problem dar, welches oft der Verwendung aufwendiger Abscheidevorrichtungen bedarf.

Windsichter weisen bei einem gleichen Durchsatz eine größere Bauweise und eine geringere Energieeffizienz als Siebanlagen oder Nasswäscher auf. Die Vorteile von Windsichtern liegen in einem variablen Trennschnitt und einer Unanfälligkeit gegenüber Verschleiß, welche in einer hohen Verfügbarkeit resultiert. Die Nachteile von Windsichtern liegen in den hohen Anforderungen an das Aufgabegut. Dieses darf bei den meisten Sichtern eine Korngröße von 2 mm nicht überschreiten. Bei größeren Körnungen sind vorgeschaltete Klassierstufen notwendig. Ebenfalls sind Windsichter anfällig gegenüber der Feuchtigkeit des Materials und sogar der Luftfeuchtigkeit. Mit zunehmender Feuchtigkeit, steigen die Haftkräfte zwischen groben und feinen Körnungen im Material, was dazu führt, dass die Körnungen nicht mehr effektiv dispergiert werden können. So ist eine effektive Klassierung ab einem Feuchtigkeitsgehalt von 1,5 % nicht mehr möglich [9] [23]. Ein Großteil der Windsichter, insbesondere Zentrifugalkraftsichter, ist für die Nachrüstung ungeeignet. Allerdings können einige Schwerkraftsichter, wie z. B. Kaskadensichter, zur Nachrüstung bestehender Aufbereitungsanlagen eingesetzt werden, da sich diese aufgrund der geringen Bauhöhe unkompliziert in den Förderstrom integrieren lassen. Diese weisen allerdings einen erhöhten Energiebedarf auf.

Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik

Während der Abbau-, Transport- und Aufbereitungsprozesse von Gesteinskörnungen werden zwischen 10 % und 20 % dieser Körnungen auf eine Korngröße von weniger als 63 μm zerkleinert [1]. Dieses Kornspektrum wird als Gesteinsfüller bezeichnet. Derart hohe Gesteinsfülleranteile wirken sich negativ auf die Produktqualität der Baustoffe aus. Bei der Asphaltherstellung muss der Fülleranteil z. B. zwischen 5 % und 10 % liegen. Wird dieser Gehalt unterschritten, kann es zur Spurrillenbildung und zum Asphaltbluten kommen. Wird der Gehalt überschritten, so wird der Asphalt zerbrechlicher und rissanfälliger. Verschiedene Normen legen dabei Maximalgehalte von zwischen 3 % bis zu über 16 % Gesteinsfüller je Körnung und Verwendungszweck fest.

Eine Reduzierung des Gesteinsfülleranteils ist folglich unabdingbar. Gerade die Anforderungen an die Baustoffqualitäten, insbesondere an den Gesteinsfülleranteil, haben sich in den letzten Jahrzehnten zunehmend verschärft. Im Zuge dessen können einige Betriebe den Gesteinsfülleranteil der Körnungen mit den bestehenden Aufbereitungsanlagen nicht ausreichend reduzieren. Die Aufbereitungsanlagen weisen dabei oft keine ausreichenden Lager- und Klassier- Kapazitäten auf, um sämtliche gewonnen Gesteinskörnungen zu klassieren. Infolgedessen wird ein Teil dieser Körnungen auf Halden gelagert und kann der Wirtschaft nicht zugeführt werden. Die Nachrüstung der Aufbereitungsanlagen mit einem weiteren Klassierer ist aufgrund aufwendiger Genehmigungsverfahren und ohne den Umbau der Aufbereitungsanlagen, um den benötigten Platz für einen weiteren Klassierer zu schaffen, oft nicht wirtschaftlich.

Die Lösung dieser Problematik bedingt eine Anlage, welche in die Aufbereitungsprozesse integriert werden kann, ohne dass eine spezielle vorgeschaltete Lagerung der Gesteinskörnungen notwendig ist. Eine solche Anlage sollte niedrigbauend und energieeffizient sein, die für die Verwendungszwecke benötigte Trennschärfe aufweisen und für höhere Durchsätze geeignet sein.

Eine solche niedrigbauende Anlage könnte z. B. an Bandübergabestationen eine Anwendung finden. Somit wäre für die Entfüllung kein weiterer Prozessschritt, wie z. B. eine vorgeschaltete Lagerung in Silos, notwendig. Ebenso kann der Aufwand von Genehmigungsverfahren durch eine niedrige Bauweise reduziert werden. Des Weiteren erlaubt die Installierbarkeit der Neuentwicklung an Bandübergabestationen eine unkomplizierte Nachrüstung bestehender Aufbereitungsanlagen. Somit können mehr Gesteinskörnungen entfüllert werden und das Verfahren kann einen Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz der Steine- und Erden- Industrie leisten.

Für den genannten Verwendungszweck sind Siebanlagen, Hydroklassierer und Zentrifugalkraft- Windsichter aufgrund ihrer aufwendigen Bauweise ungeeignet. Schwerkraft- Windsichter sind prinzipiell für diesen Einsatzzweck geeignet. Allerdings müssen hierbei die hohen Anforderungen an die Korngröße ($> 2 \text{ mm}$) und Feuchtigkeit ($> 1,5 \%$) des Aufgabeguts berücksichtigt werden. Speziell für die Entfüllung konzeptionierte Windsichter, wie z. B. Kaskadensichter, sind zwar niedrigbauend konzeptioniert und zur Anlagennachrüstung eingesetzt, weisen allerdings eine vergleichsweise

geringe Energieeffizienz auf (siehe Anhang: Abbildung 63) . Ein für besagten Verwendungszweck geeignetes, niedrigbauendes und zugleich energieeffizientes Verfahren gibt es derzeit nicht.

4 Methodik

Ein derart niedrigbauendes und energieeffizientes Verfahren, welches die besagte Problemstellung der Steine- und Erden- Industrie lösen soll, ist unter der Patentnummer DE 10 2018 115 480 A1 beschrieben worden. Die Patentschrift beschreibt das Verfahren als einen Querstromsichter, bei welchem eine mit rotierenden „Paddeln“ versehene Dispergiereinheit Teile des Partikelkollektivs dosiert erfasst und parallel zur Strömungsrichtung in den Strömungskanal befördert, wobei eine Fraktionierung von fein nach grob durch unterschiedliche, Korngrößenabhängige Widerstandskräfte auftritt. Das Feinstgut hingegen wird durch eine Absauge-Einheit aus dem Klassierraum entfernt. Die Anlage dient gemäß der Patentschrift dem Entfernen von Körnungen $< 63 \mu\text{m}$ aus Feinsanden mit einer Korngröße von bis zu 5 mm [10] [42]. Das Verfahren wird im Folgenden als „Neuentwicklung“ und als „Schlagleisten-Querstromsichter“ bezeichnet.

Das Ziel dieser Dissertation ist die Überprüfung der technischen und wirtschaftlichen Eignung dieser Neuentwicklung für den vorgestellten Verwendungszweck, welcher eine Installation des Schlagleisten-Querstromsichters an Bandübergaben und damit eine Integrierbarkeit in laufende Förder- und Aufbereitungsprozesse vorsieht. Dies erfordert eine Analyse der Funktionsweise dieser Neuentwicklung, welche im folgenden Kapitel dargelegt wird. Diese Analyse stellt das Zusammenspiel von vier verschiedenen Gerätekomponten vor und geht dabei auf die Aufgaben der jeweiligen Komponenten ein. Hierbei werden verschiedene strömungs- und energietechnische Aspekte betrachtet. Neben einer qualitativen Beschreibung der Funktionsweise wird diese anhand von grundlegenden physikalischen und strömungsmechanischen Zusammenhängen quantitativ erläutert, welche im Zuge verschiedener Laboruntersuchungen validiert werden. Diese Laboruntersuchungen umfassen zunächst die Ermittlung der Strömungsverhältnisse und die Bestimmung des Energieverbrauchs. Zur Bestimmung der Strömungsverhältnisse erfolgen Messungen mit einem Hitzdraht- Anemometer und der Energieverbrauch wird mit Leistungsmessgeräten ermittelt. Die Funktionsweise von diesen und allen weiteren eingesetzten Messgeräte wird im Anhang: „Anhang 9: Beschreibung der Messgeräte“ erläutert.

Durch die Laboruntersuchungen sollen die theoretisch formulierten Zusammenhänge validiert werden. Diese validierten Zusammenhänge zeigen die Verknüpfungen zwischen den einzelnen Komponenten des Sichters auf. Dies ermöglicht eine Dimensionierung der Neuentwicklung in Abhängigkeit von lediglich zwei Parametern: dem Durchsatz und der zulässigen Gutbeladung.

Die zulässige Gutbeladung beschreibt den maximal zulässigen Durchsatz in Relation zu einer bestimmten Fluidströmung. Wird die zulässige Gutbeladung überschritten, so nimmt die Trennschärfe des Systems ab. Die zulässige Gutbeladung wird maßgeblich von der räumlichen Gestaltung des Klassierraums und der Art der Dispergierung beeinflusst [22] [24]. Sie unterscheidet sich bei funktionsgleichen Sichtern, die für verschiedene Durchsätze konzeptioniert worden sind, kaum, kann aber zwischen verschiedenen Klassierverfahren stark variieren. Die zulässige Gutbeladung der Neuentwicklung wird mittels Laboruntersuchungen ermittelt.

Diese Labortests, welche in Kapitel 6 vorgestellt werden, bestehen aus Klassiervorgängen bei denen bestimmte Parameter eingestellt werden. Sie haben das Ziel, die Trennschärfe bei Klassierprozessen unter der Einstellung verschiedener Parameter, wie z. B. dem Strömungsvolumenstrom und dem Durchsatz, zu bestimmen. Die Trennschärfe ermittelt sich anhand zweier wesentlicher Größen, die am Grobgut und Feingut gemessen werden können. Diese sind der Fülleranteil im Grobgut nach der Klassierung und der Fehlkornanteil im Feingut, d. h. der Anteil an Körnungen, die größer als 63 μm sind. Beide Parameter werden mittels Luftstrahlsiebung nach den Klassiervorgängen ermittelt. Vor den Klassiervorgängen sind weitere Siebanalysen am Aufgabegut durchgeführt worden, um dessen Gesteinsfülleranteil zu bestimmen. Dieser liegt im Mittel bei 11,8 %. Das Aufgabegut wird im Anhang: „Anhang 10: Beschreibung des Klassierguts“ beschrieben.

Die Bestimmung der zulässigen Gutbeladung ermöglicht eine Abschätzung der Baugröße und des Energiebedarfs anhand der in Kapitel 5 beschriebenen Zusammenhänge. Anhand dieser können der Energiebedarf und die Bauhöhe auch bei größeren Durchsätzen mit dem Stand der Technik verglichen werden. Somit kann eine technisch-wirtschaftliche Bewertung des Verfahrens erfolgen. Diese erfolgt in Kapitel 7.

5 Funktionsweise der Neuentwicklung

Dieses Kapitel beschreibt die Dimensionierung und die Funktionsweise der als Schlagleisten-Querstromsichter bezeichneten Neuentwicklung. Die Funktionsweise wird anhand von physikalischen Zusammenhängen vorgestellt, welche durch Laboruntersuchungen an einer Testanlage überprüft werden. Diese Testanlage ist fotografisch in Abbildung 13 dargestellt:

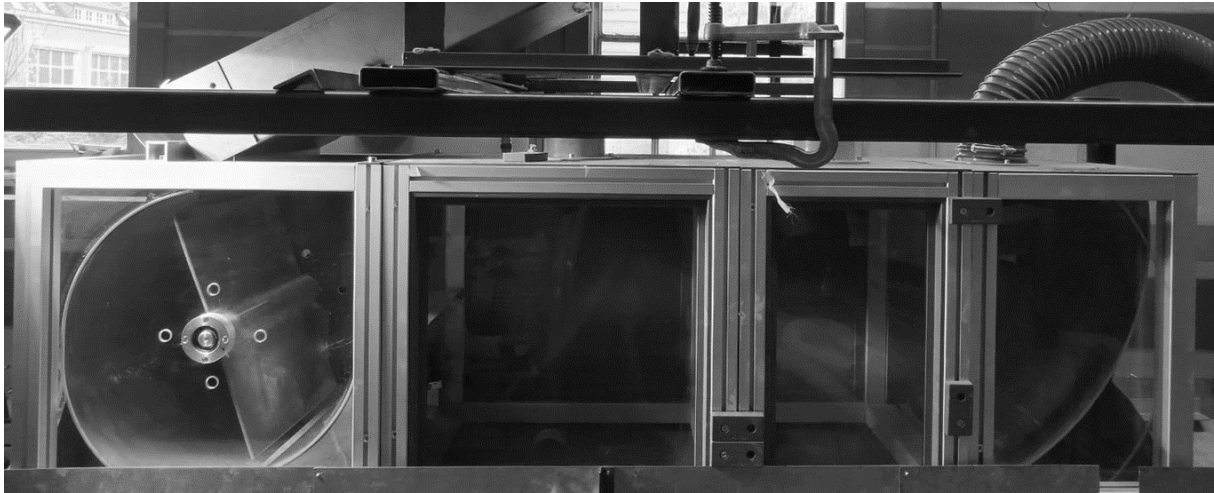


Abbildung 13: Fotografische Darstellung des Klassierers als Testanlage

Die vier Hauptkomponenten des Schlagleisten-Querstromsichters sind die Materialaufgabe, die Dispergiereinheit, der Strömungskanal bzw. der Klassierraum und die Absaugeinheit, welche eine Verbindung zum Feingutaustrag herstellt. Diese Komponenten sind schematisch in Abbildung 14 dargestellt:

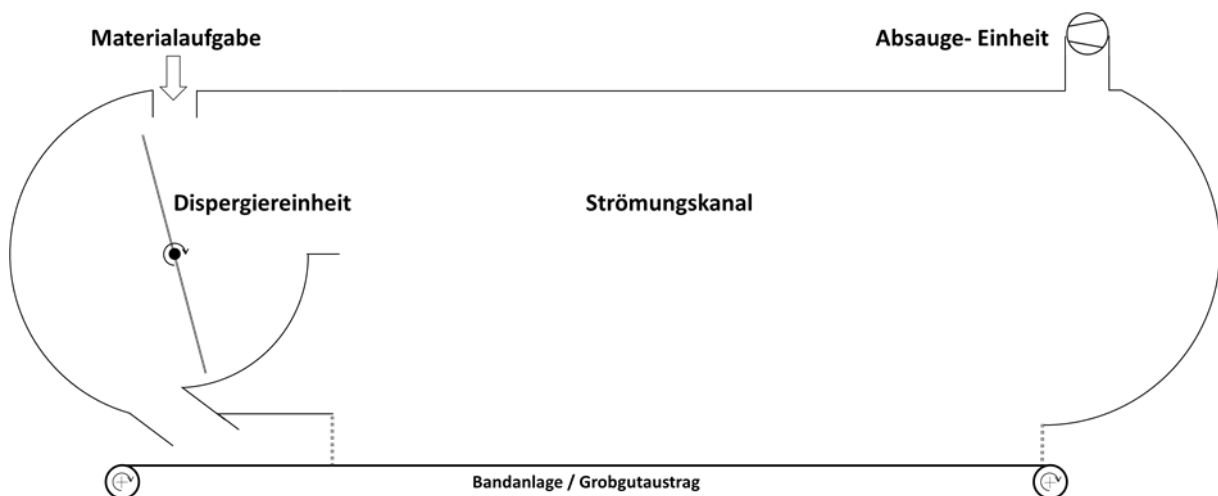


Abbildung 14: Schematische Darstellung des Klassierers und seiner 4 Hauptkomponenten

Das Klassiergut wird gleichmäßig, kontinuierlich und räumlich gezielt über eine Aufgabeeinheit in den Dispergierraum des Klassierers eingeführt. Dieser Aufgabeeinheit soll beim industriellen Einsatz eine Bandanlage vorgeschaltet sein. Im Labor wird ein speziell für die Materialaufgabe konzipierter Behälter verwendet. Nach der Aufgabe tritt das Klassiergut in den Dispergierraum ein. In diesem befindet sich eine zentral angeordnete, rotierende Welle, an welcher Schlagleisten befestigt sind. Das Klassiergut wird von diesen Schlagleisten diskontinuierlich erfasst, während es in den Dispergierraum fällt. Dabei wird es dispergiert und in Folge des Impulses in den Strömungskanal befördert. Durch die Rotation der Schlagleisten wird eine Luftströmung erzeugt. Die Funktionsweise gleicht dabei der eines Radiallüfters. Das Grobgut wird in den Strömungskanal geworfen. Durch die Strömungswiderstandskraft kommt es zu einer partikelgrößenabhängigen Abbremsung der Partikel. Diese führt dazu, dass sich die Partikel in Abhängigkeit der Wurfweite von fein nach grob im Strömungskanal anreichern, von wo diese über eine Bandanlage ausgetragen werden. Das Feingut hingegen, reichert sich in der Luftströmung an und sedimentiert nur teilweise. Das Feingut wird am Ende des Strömungskanals von einer Absauge- Strömung erfasst und zu einem Feingutabscheider transportiert. Der Strömungskanal weist an seinem hinteren Ende ein gekrümmtes Profil auf, welches besseren Leitung der Strömung und zum Abscheiden von Fehlkorn dient.

Die folgenden Abschnitte dieses Kapitels liefern eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise der jeweiligen Komponenten. Hierfür wird die Funktionsweise der Komponenten anhand von physikalischen Zusammenhängen beschrieben, welche durch Laboruntersuchungen validiert werden. Anhand dieser Vorgehensweise können die verschiedenen Komponenten in Abhängigkeit zueinander und in Abhängigkeit vom Durchsatz dimensioniert werden. Diese Dimensionierungen sind nicht nur für den Bau einer Industrie-Anlage von Bedeutung, sondern ermöglichen auch eine Abschätzung der Baugröße und des Energieverbrauchs bei höheren Durchsätzen.

5.1 Funktionsweise der Materialaufgabe

Die Materialaufgabe hat die Funktion, das Klassiergut gleichmäßig, kontinuierlich und räumlich gezielt in die Dispergiereinheit einzuführen. Das Aufgabegut wird dabei mit einem Massenstrom \dot{M} in den Klassierer eingeführt. Die wesentlichen Eigenschaften des Aufgabeguts sind dessen Feuchtigkeit $\%_{\text{ow}}$, Dichte ρ_P und Schüttgutfaktor F_B sowie die Korngrößenverteilung, bei welcher insbesondere der Feingutanteil $\%_{\text{Feingut}}$ von Bedeutung ist. Die Aufgabeeinheit muss so konzipiert werden, dass die Effektivität der Dispergierung gewährleistet ist. Die Wurfbahnen der Partikel sind dabei von der Ausrichtung der Aufgabeeinheit abhängig. Dieser Zusammenhang wird in Kapitel 5.2 näher erläutert. Das Ziel der Betrachtung der Aufgabeeinheit ist die Bestimmung des Eintrittspunktes der Partikel in die Dispergiereinheit und der Partikelgeschwindigkeit an diesem Punkt. Diese Parameter stellen die Ausgangsvariablen für die Dimensionierung der Dispergiereinheit dar. Zur Ermittlung dieser Parameter werden zunächst die prinzipiellen, physikalischen Zusammenhänge der Materialaufgabe beschrieben. Anschließend wird die für die Laboruntersuchungen verwendete Aufgabeeinheit vorgestellt.

Physikalische Grundlage der Materialaufgabe

Der Einsatz des Schlagleisten-Querstromsichters in der Industrie ist an Bandübergabestationen vorgesehen. Dabei wird das Klassiergut über eine Bandanlage an den Klassierer überführt und das Grobgut wird durch eine weitere Bandanlage abtransportiert. Für die Laboruntersuchungen ist keine kontinuierliche Materialaufgabe über eine Bandanlage möglich gewesen. Daher ist ein spezieller Behälter für die Materialaufgabe konzeptioniert worden.

Die für den industriellen Einsatz vorhergesehene Materialaufgabe besteht neben der Bandanlage aus zwei weiteren Komponenten: Einer Rutsche und einem Fallschacht. Der schematische Aufbau dieser Materialaufgabe ist in Abbildung 15 schematisch dargestellt:

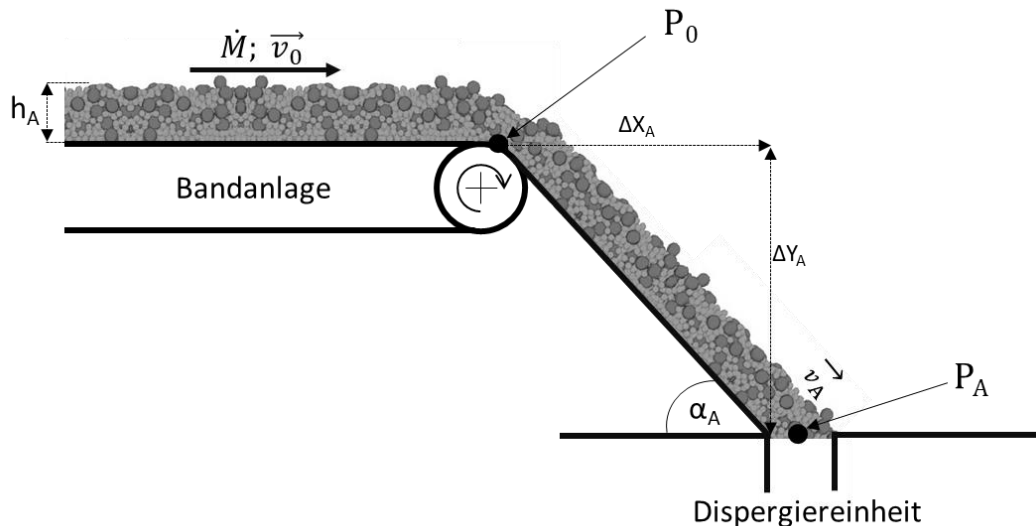


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Materialaufgabe

Das Aufgabegut verlässt die Bandanlage am Punkt P_0 mit einer Geschwindigkeit \vec{v}_0 und wird auf eine Rutsche befördert. Das Partikelkollektiv weist dabei eine Höhe h_A auf und ist über die Breite der Bandanlage b verteilt. Die Breite des Klassierers und all seiner Komponenten ist an dieser Breite auszurichten. Die Höhe des Aufgabeguts steht in Relation zur dessen Geschwindigkeit, Breite und zum Durchsatz bzw. Massenstrom \dot{M} . Auf der Rutsche wird das Aufgabegut durch die Gravitation beschleunigt. Die Rutsche ist dabei durch ihre Länge L_A und den Neigungswinkel α_A charakterisiert. Aus diesen Werten lassen sich ebenfalls die Höhe ΔY_A und Weite ΔX_A der Rutsche ableiten. Diese Parameter der Rutsche sind so zu dimensionieren, dass das Partikelkollektiv an dem Punkt P_A mit einer Geschwindigkeit \vec{v}_A in die Dispergiereinheit eintritt. Der Punkt P_A sollte dabei direkt vertikal über der Drehachse der Dispergiereinheit liegen. Als Ursprung eines Referenzsystems bzw. Koordinatensystems kann z. B. die Drehachse der Dispergiereinheit verwendet werden. Die Geschwindigkeit \vec{v}_A sollte dabei so gering wie möglich sein und eine möglichst geringe horizontale Komponente aufweisen. Diese horizontale Geschwindigkeitskomponente kann durch einen Fallschacht weiter reduziert werden. P_A und \vec{v}_A sind die Zielparameter bei der Dimensionierung der Aufgabeeinheit und die Ausgangsparameter für die Dimensionierung der Dispergiereinheit. Das „A“ in der Parameterbezeichnung steht für die Aufgabeeinheit.

Nachdem die Partikel die Bandanlage am Punkt P_0 mit einer Geschwindigkeit \vec{v}_0 verlassen, gelangen sie auf die Rutsche und werden dort durch die Hangabtriebskraft F_{Ah}

beschleunigt und durch eine Reibungskraft \mathbf{F}_{AR} abgebremst. Für die effektive Beschleunigung \mathbf{a}_A gilt:

$$a_A = \frac{F_{Ah} - F_{AR}}{m} = \frac{m g \sin \alpha_A - m g \mu_{AR} \cos \alpha_A}{m} = g (\sin \alpha_A - \mu_{AR} \cos \alpha_A) \quad (2)$$

Wobei g die Erdbeschleunigung, m die Masse des Aufgabeguts und α_A die Neigung der Rutsche ist. Aufbauend auf die Beschleunigung der Partikel \mathbf{a}_A lässt sich die effektive Geschwindigkeit der Partikel am Ende der Rutsche $|\vec{v}_A|$ wie folgt berechnen:

$$|\vec{v}_A| = |\vec{v}_0| + a_A t_A \quad (3)$$

Wobei t_A die Zeit ist, die die Partikel benötigen, um die Rutsche zu passieren. Diese lässt sich in Abhängigkeit der Rutschenlänge L_A und der Startgeschwindigkeit $|\vec{v}_0|$ wie folgt berechnen:

$$t_A = -\frac{|\vec{v}_0|}{a_A} \pm \sqrt{\left(\frac{|\vec{v}_0|}{a_A}\right)^2 + \frac{2L_A}{a_A}} = \frac{-|\vec{v}_0| \pm \sqrt{|\vec{v}_0|^2 + 2 a_A L_A}}{a_A} \quad (4)$$

Über die Zeit t_A und die Beschleunigung \mathbf{a}_A lässt sich nun die effektive Geschwindigkeit der Partikel $|\vec{v}_A|$ am Ende der Rutsche berechnen:

$$|\vec{v}_A| = \sqrt{|\vec{v}_0|^2 + 2 a_A L_A} = \sqrt{|\vec{v}_0|^2 + 2 g (\sin \alpha_A - \mu_{AR} \cos \alpha_A) L_A} \quad (5)$$

Vektoriell lässt sich die Geschwindigkeit $|\vec{v}_A|$ wie folgt darstellen:

$$\vec{v}_A = |\vec{v}_A| \begin{pmatrix} \cos \alpha_A \\ \sin \alpha_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{Ax} \\ v_{Ay} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Der Eintrittspunkt des (Schwerpunkts des) Partikelkollektivs in die Dispergiereinheit \mathbf{P}_A steht in folgender Relation zum Startpunkt \mathbf{P}_0 , zu der Höhe ΔY_A und Weite ΔX_A der Rutsche sowie zur halben Höhe des Förderstroms \mathbf{h}_A :

$$P_A = P_0 + \begin{pmatrix} \Delta X_A \\ \Delta Y_A \end{pmatrix} + \frac{1}{2} h_A \begin{pmatrix} \cos \alpha_A \\ \sin \alpha_A \end{pmatrix} \quad (7)$$

Wobei sich die Höhe des Förderstroms an dieser Stelle in Abhängigkeit der Breite der Bandanlage \mathbf{b} , der Partikelgeschwindigkeit \vec{v}_A der Dichte ρ_P und des Schüttgutfaktors \mathbf{F}_B sowie des Massenstroms $\dot{\mathbf{M}}$ wie folgt berechnet:

$$h_A = \frac{\dot{M} F_B}{|\vec{v}_A| \cdot \rho_P} \quad (8)$$

Die Koordinate \mathbf{P}_A und die Geschwindigkeit \vec{v}_A der Partikel beim Eintritt in die Dispergiereinheit spielen für die Funktionsweise der Dispergiereinheit und für die Trennschärfe des Klassierers eine entscheidende Rolle. Nach dem Eintritt in die Dispergiereinheit fallen die Partikel herab, bis sie von den rotierenden Schlagleisten der Dispergiereinheit erfasst werden. Bei der Kollision wirkt ein Impuls auf die Partikel, welcher diese in Richtung der Umfangsgeschwindigkeit der Schlagleisten befördert. Dieser Impuls muss möglichst horizontal gerichtet sein, damit die Partikel in den angrenzenden Strömungskanal geworfen werden und somit die Gutbeladung in der Dispergiereinheit reduziert wird. Hierfür sollten die Partikel mit einer möglichst geringen Geschwindigkeit und einem möglichst geringen horizontalen Abstand zur Drehachse in die Dispergiereinheit eingeführt werden, da ansonsten ein Teil des Partikelkollektivs nicht gezielt geworfen werden kann. Folglich ist die Rutsche so zu dimensionieren, dass sich \mathbf{P}_A vertikal über der Drehachse befindet. Die Neigung der Rutsche sollte so gewählt werden, dass das Aufgabegut zu einem Großteil durch Reibungskräfte ausgebremst wird, bevor es in die Dispergiereinheit eintritt. Der Fallschacht dient dabei dazu, die horizontale Bewegungskomponente der Partikel einzuschränken.

Labortechnische Betrachtung der Materialaufgabe

Da bei den Laboruntersuchungen keine Materialaufgabe über eine Bandanlage erfolgen konnte, ist eine spezielle Vorrichtung konzipiert worden, welche eine kontinuierliche Materialaufgabe bei regelbaren Massenströmen gewährleistet.

Hierzu ist zunächst ein Konzept getestet worden, bei welchem das Aufgabegut über einen Big Bag dosiert auf eine Rutsche gegeben worden ist. Eine kontinuierliche Materialaufgabe über die gesamte Breite des Klassierers ist mit diesem Konzept nicht möglich gewesen, da das Aufgabegut nur punktuell aufgegeben werden konnte und da es während der Aufgabe zu Schwallbildung gekommen ist. Folglich ist ein zweites Konzept zur Materialaufgabe entwickelt worden. Dieses besteht aus einem geneigten Behälter, in dem eine bestimmte Menge an Klassiergut gelagert werden kann. Dieser

ist mit einer verschließbaren Öffnung versehen. Gemäß diesem Konzept ist die Aufgabevorrichtung der Laboranlage entwickelt worden. Diese ist in Abbildung 16 fotografisch darstellt:

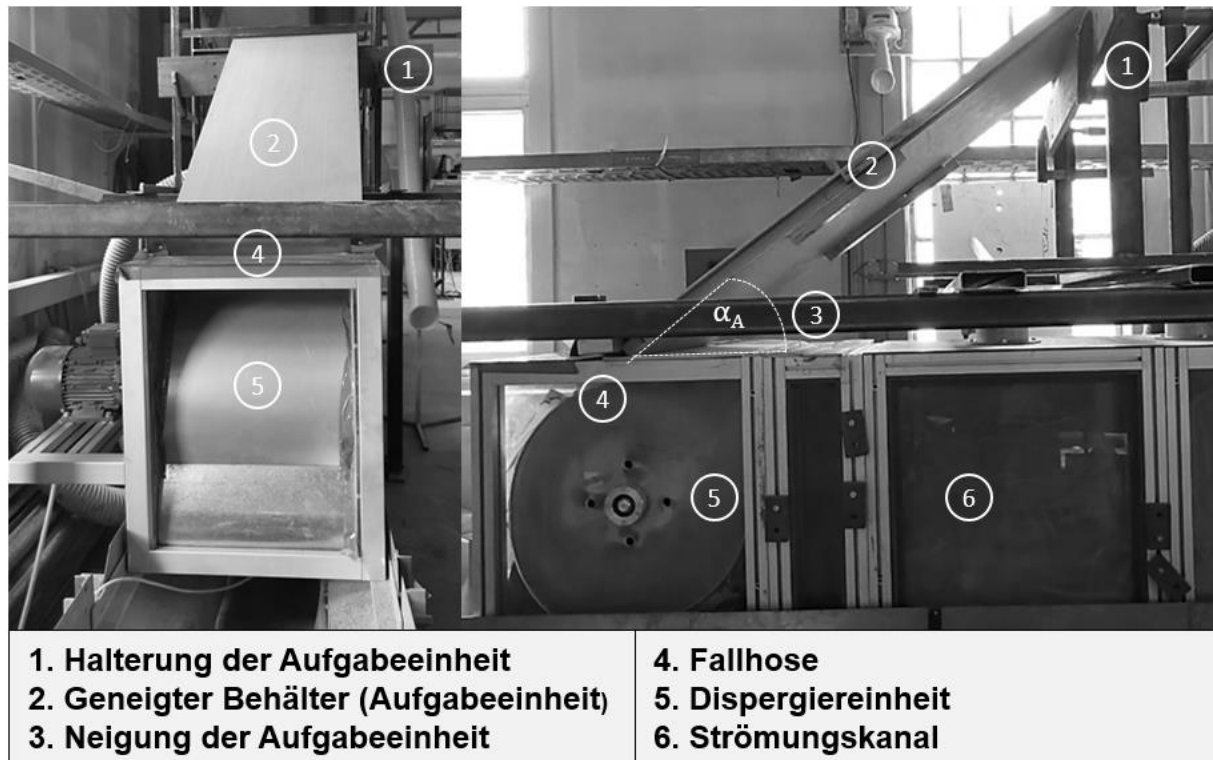


Abbildung 16: Fotografische Darstellung der Aufgabeeinheit für die Laboruntersuchungen (Ansicht von hinten (links) und Seitenansicht (rechts))

Abbildung 16 stellt die Aufgabeeinheit des Klassierers in einer Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts) dar. Die Halterung, an welcher der Behälter befestigt wird, der Aufgabe-Behälter und die Dispergiereinheit sind dabei hervorgehoben. Die Halterung lässt sich in der Höhe und in der Horizontale verschieben. So kann die Neigung der Aufgabeeinheit eingestellt werden. Zur Vermeidung einer Staubbelastung ist der Übergang zwischen der Aufgabeeinheit und der Dispergiereinheit mit Gummilappen versiegelt worden. So kann verhindert werden, dass Staub bei der Aufgabe austritt. Zur Beschreibung der Funktionsweise der Aufgabevorrichtung ist diese in Abbildung 17 schematisch dargestellt worden:

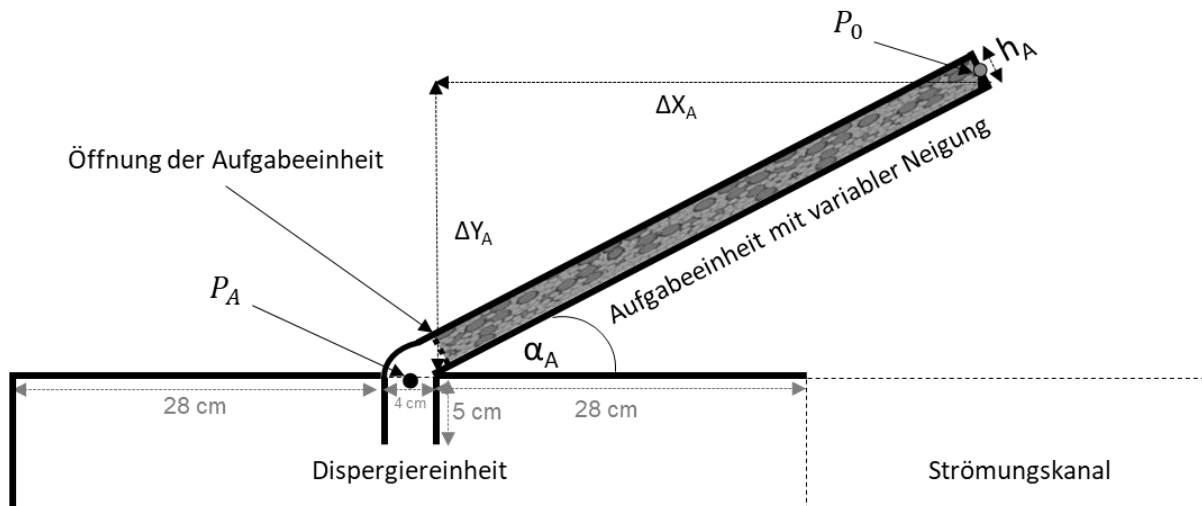


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Aufgabeeinheit für die Laboruntersuchungen

Die Aufgabevorrichtung soll in der Art der Materialaufgabe einer Bandanlage gleichen, welche eine kontinuierliche Aufgabe über die gesamte Breite des Klassierers hinweg ermöglicht. Hierfür wird ein geeigneter Behälter verwendet, der mit dem Aufgabegut befüllt werden kann. Der Behälter ist fast genauso breit wie der Klassierer ($b_A = 37,5 \text{ cm}$) und ist bis zur verschließbaren Öffnung am unteren Ende $l_A = 1,12 \text{ m}$ lang. Insgesamt verfügt der Behälter über eine Länge l_A von $1,17 \text{ m}$. Diese zusätzliche Länge von 5 cm ermöglicht den Einbau einer Metallschiene am unteren Ende des Behälters. Mit dieser kann der Behälter geöffnet und geschlossen werden. Vor jedem Versuch wird der Behälter mit dem Aufgabegut befüllt. Die Höhe des Aufgabeguts lässt h_A sich dabei einstellen. Für die Versuche ist eine Höhe von $1,2 \text{ cm}$ eingestellt worden. Nach der Befüllung wird der Behälter mit einem Deckel verschlossen. Die Partikeldichte ρ_P , die Dichte von Gabbro, entspricht nach Schön (1983) ca. 2970 kg/m^3 [43]. Die Schüttdichte der Körnungen ist im Labor als 1750 kg/m^3 bestimmt worden. Daraus errechnet sich ein Schüttgutfaktor F_B von $1,7$. Die Masse, mit welcher der Behälter befüllt werden kann, berechnet sich aus dem Produkt der Dimensionen des Behälters und der Schüttdichte der Partikel wie folgt:

$$M_A = \frac{\rho_P l_A b_A h_A}{F_B} = 0,00504 \text{ m}^3 * 1750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 8,8 \text{ kg} \quad (9)$$

Bei jedem Versuch beträgt die Masse des Aufgabeguts folglich ca. $8,8 \text{ kg}$, insofern eine Behälterhöhe h_A von $1,2 \text{ cm}$ eingestellt worden ist. Für die jeweiligen Versuche wird der Behälter zunächst befüllt, dann an der Unterseite durch eine Metallschiene

und an der Oberfläche durch einen Deckel verschlossen. Anschließend wird in Abhängigkeit des gewünschten Massenstroms eine Rutschenneigung α_A eingestellt. Hierzu wird das hintere Ende der Rutsche an einem Gerüst befestigt, wohingegen das vordere Ende der Rutsche an die Öffnung der Dispergiereinheit grenzt. Abschließend wird die Metallschiene aus dem Behälter gezogen, was darin resultiert, dass die Partikel am unteren Ende aus dem Behälter fallen. Die Partikel werden dabei durch die Beschleunigung a_A beschleunigt. Diese berechnet sich gemäß der Gleichung 21 in Abhängigkeit der Neigung α_A und des Reibungskoeffizienten μ_A . Anhand der Beschleunigung und der Länge der Aufgabeeinheit L_A kann die Geschwindigkeit der Partikel an der Behälteröffnung $|\vec{v}_A|$ gemäß der Gleichung 27 wie folgt berechnet werden:

$$|\vec{v}_A| = \sqrt{2 g (\sin \alpha_A - \mu_{AR} \cos \alpha_A) L_A} \approx 4,79 \frac{m}{s} \sqrt{\sin \alpha_A - \mu_{AR} \cos \alpha_A} \quad (10)$$

Zur Bestimmung dieser Geschwindigkeit und damit auch zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten ist eine Testreihe im Labor durchgeführt worden. Bei dieser sind in verschiedenen Versuchen verschiedene Rutschenneigungen α_A eingestellt worden. Anschließend ist der gefüllte Behälter geöffnet und die Zeit, in welcher die Körnungen aus diesem gefallen sind, gemessen worden. So konnten unterschiedlichen Rutschenneigungen α_A verschiedene Fallzeiten t_A zugeordnet werden. Mit diesen kann der Massenstrom \dot{M} aus dem Quotienten der Probemasse M und der Testzeit t_A berechnet und die Geschwindigkeit $|\vec{v}_A|$ aus dem Quotienten der Länge des Behälters L_A und der Testzeit t_A bestimmt werden. Der in den Versuchen ermittelte Zusammenhang zwischen dem Massenstrom \dot{M} , der Geschwindigkeit $|\vec{v}_A|$ und der Neigung des Behälters α_A ist in Abbildung 18 dargestellt:

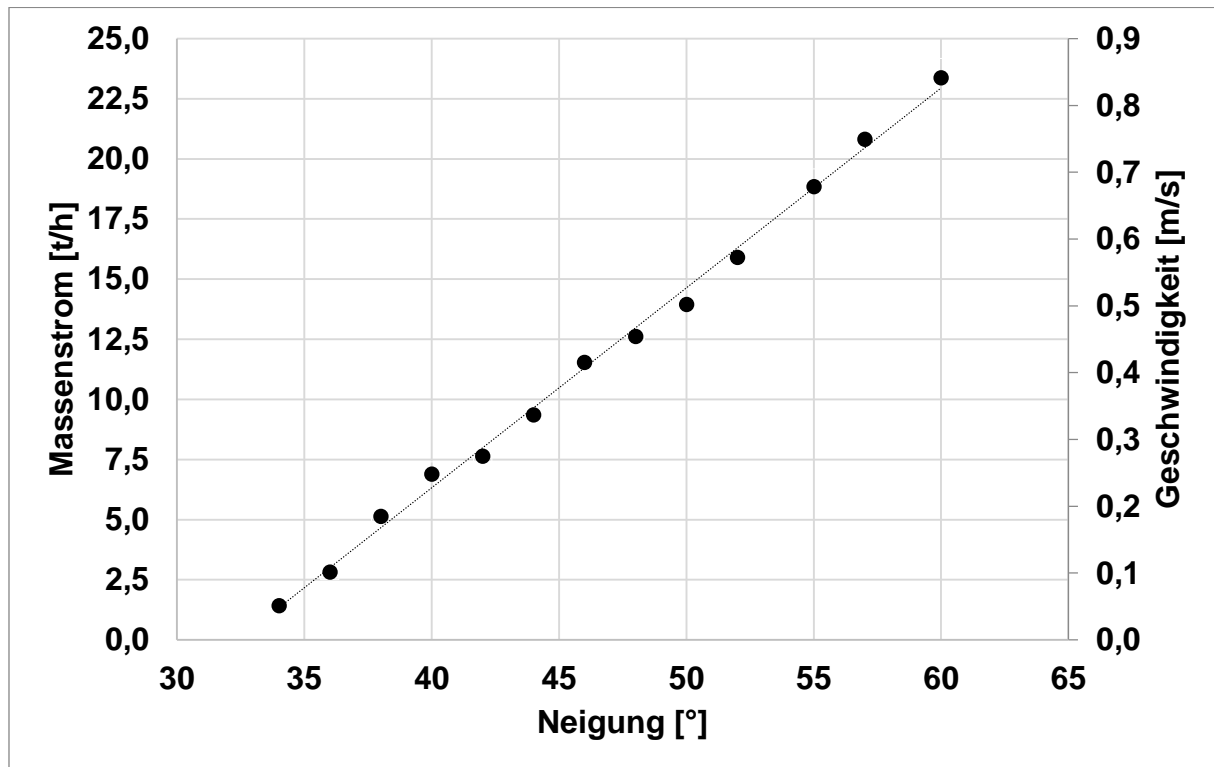


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen der Neigung der Materialaufgabe und dem Massenstrom sowie der Fördergeschwindigkeit

Zwischen dem Massenstrom und der Neigung der Aufgabeeinheit besteht ein linearer Zusammenhang. Der Korrelationsindex dieses Zusammenhangs beträgt 0,9982. Der empirische ermittelte Zusammenhang zwischen der Neigung α_A und dem Massenstrom \dot{M} [t/h] ist der Folgende:

$$\dot{M} \approx 0,8306 \alpha_A - 26,92 \quad (11)$$

Dies geht mit dem folgenden empirischen Zusammenhang zwischen der Neigung α_A und der Geschwindigkeit der Partikel beim Verlassen der Aufgabeeinheit $|\vec{v}_A|$ einher:

$$|\vec{v}_A| \approx 0,03 \alpha_A - 0,97 \quad (12)$$

Die minimale Neigung, die benötigt wird, damit die Partikel sich bewegen, beträgt 32,4 °. Daraus ergibt sich ein Haftreibungskoeffizient von 0,63.

Da die Aufgabeeinheit direkt an die Öffnung des Klassierers angeschlossen ist, treten die Partikel von der Aufgabeeinheit quasi direkt in den Dispergierraum ein. Insofern entspricht \mathbf{P}_0 in diesem Fall \mathbf{P}_A und \vec{v}_0 gleicht \vec{v}_A . Für die Dimensionierung einer Aufgabeeinheit in der Industrie ist allerdings eine differenzierte Betrachtung dieser Koordinaten und Geschwindigkeiten notwendig.

Beim Eintritt der Körnungen in die Dispergiereinheit werden die Körnungen durch einen Fallschacht begrenzt, welche 5 cm lang ist und über eine variierbare Weite verfügt. Es wird angenommen, dass der Fallschacht als Formwiderstand die horizontale Geschwindigkeitskomponente zum Teil ausbremst. So wird folgende vereinfachte Annahme getroffen:

$$v_{Ay} \approx |\vec{v}_A| \approx (0,03 \alpha_A - 0,97) \quad (13)$$

Gemäß dieser Annahme lassen sich vertikale Geschwindigkeiten von bis zu 1,73 m/s bei einer Neigung von 90 ° realisieren. Dies entspricht einem Massenstrom von ca. 47,8 t/h. Der Massenstrom lässt sich ebenfalls über die Weite des Fallschachts einstellen. Diese muss minimal so weit sein, wie der Behälter hoch ist. Tabelle 5 fasst die Dimensionierung der Aufgabevorrichtung bei einer Neigung des Behälters von 36 ° zusammen:

Symbol	Bezeichnung	Wert	Einheit	Formel/Kommentar
Ausgangsparameter				
\dot{M}	Massenstrom	2,98	t/h	$\dot{M} \approx 0,8306 \alpha_A - 29,92$
ΔX_A	Weite der Rutsche	0,95	m	$\Delta X_A = \cos \alpha_A L_A$
ΔY_A	Höhe der Rutsche	0,69	m	$\Delta Y_A = \sin \alpha_A L_A$
l_A	Länge des Behälters	1,12	m	
L_A	Länge der Rutsche	1,17	m	
α_A	Neigung der Rutsche	36	°	variabel
b_A	Breite der Rutsche	0,375	m	
b	Breite der Anlage	0,4	m	Sollte der Breite des Förderbands entsprechen
h_A	Höhe des Aufgabeguts / Behälters	0,012	m	
ΔY_{0B}	Vertikaler Abstand zwischen P0 und der Dosiereinheit	0	m	
P_0	Startpunkt der Aufgabe (auf der Rutsche)	$P_0 = P_A$		Das Material wird direkt beim Austritt aus dem Behälter aufgegeben
v_0	Startgeschwindigkeit der Partikel (auf der Rutsche)	0	m/s	

Tabelle 5: Zusammenfassung der Dimensionierung der Aufgabeeinheit

Unter der Berücksichtigung der Partikeldichte ($\rho_P = 2970 \text{ kg/m}^3$), des Schüttgutfaktors ($F_B = 1,7$) und der Erdbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) lassen sich so der vertikale Abstand des Partikelstroms zur Drehachse beim Eintritt in die Dispergiereinheit P_{Ay} und die Eintrittsgeschwindigkeit v_{Ay} bestimmen. Bei einer Neigung der Aufgabevorrichtung von 36 ° ergibt sich so für P_{Ay} eine Entfernung von 0,304 m und von v_{Ay} eine Geschwindigkeit von 0,11 m/s. Diese Werte bilden eine Grundlage zur Dimensionierung der Dispergiereinheit.

Zusammenfassung der Funktionsweise der Materialaufgabe

Die Aufgabe der Materialaufgabevorrichtung ist es, das Aufgabegut kontinuierlich, gleichmäßig verteilt und räumlich gezielt in den Klassierer einzuführen. Dies ist für die Funktionalität der Dispergiervorrichtung von Bedeutung. Diese hat die Aufgabe die Partikel mit ihren rotierenden Schlagleisten zu erfassen und in den angrenzenden Strömungskanal zu werfen. Die Wurfrichtung hängt dabei vom Kollisionspunkt zwischen den Partikeln und den Schlagleisten und damit von der Position und der Geschwindigkeit der Partikel beim Eintritt in die Dispergiereinheit ab. Die Eintrittsposition sollte in möglichst geringem Abstand direkt über der Drehachse der Dispergiereinheit liegen. Die Eintrittsgeschwindigkeit sollte möglichst gering sein und nur über eine vertikale Komponente verfügen.

Um diese Ansprüchen an die Materialaufgabe gerecht zu werden, sollte beim industriellen Einsatz eine Rutsche und ein Fallschacht zwischen die Bandanlage und den Klassierer geschaltet werden. Die Breite der Rutsche sollte dabei der Breite der Bandanlage und der Breite des Klassierers entsprechen. Die Breite des Klassierers ist folglich an der Breite der Bandanlage auszurichten. Die Aufgaben der Rutsche bestehen dabei in einer räumlich gezielten Lenkung des Förderstroms und in dessen Ausbremsung durch Reibungskräfte. Der Fallschacht dient dazu, die horizontale Geschwindigkeitskomponente des Förderstroms auszubremesen, um so auch eine gezielte Dispergierung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Bandanlage zu ermöglichen. Anstatt einer Rutsche und einem Fallschacht können auch andere Systeme zum Einsatz kommen, insofern diese eine räumlich gezielte Aufgabe mit einer geringen, ausschließlich vertikalen Aufgabegeschwindigkeit erlauben.

Da für die labortechnischen Untersuchungen keine Bandanlage zur Materialaufgabe zur Verfügung gestanden hat, ist eine spezielle Aufgabevorrichtung entwickelt worden. Mit dem Laborsystem lassen sich der Massenstrom, die Aufgabegeschwindigkeit variabel einstellen, während die Aufgabeposition unverändert bleibt. Ebenso ist eine gleichmäßige und kontinuierliche Materialaufgabe über die gesamte Breite des Klassierers möglich. So kann durch die Laborvorrichtung ein gezieltes Zusammenspiel zwischen der Materialaufgabe und der Dispergiereinheit gewährleistet werden. Die Funktionsweise der Dispergiereinheit wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

5.2 Funktionsweise der Dispergiereinheit

Von der Materialaufgabe gelangen die Partikelkollektive in die Dispergiereinheit. Diese nimmt drei Aufgaben wahr:

- Das Erzeugen einer Luftströmung durch das Rotieren der Schlagleisten. Die Funktionsweise gleicht der Funktionsweise eines Radiallüfters.
- Das Ausüben eines Impulses auf die Partikel, welcher diese in den angrenzenden Strömungskanal befördert.
- Die Dispergierung und Desagglomeration des Schüttguts in Folge des Aufpralls zwischen den Partikelkollektiv und den Schlagleisten.

Die Erfüllung dieser drei Aufgaben hängt von der Dimensionierung der Komponenten der Dispergiereinheit und ihrer Drehzahl ab. Alle drei Funktionen bzw. Aufgaben müssen dabei unabhängig voneinander betrachtet werden, obwohl sich diese zum Teil auf dieselben Parameter beziehen. Die Dispergiereinheit der Testanlage ist fotografisch in Abbildung 19 abgebildet:

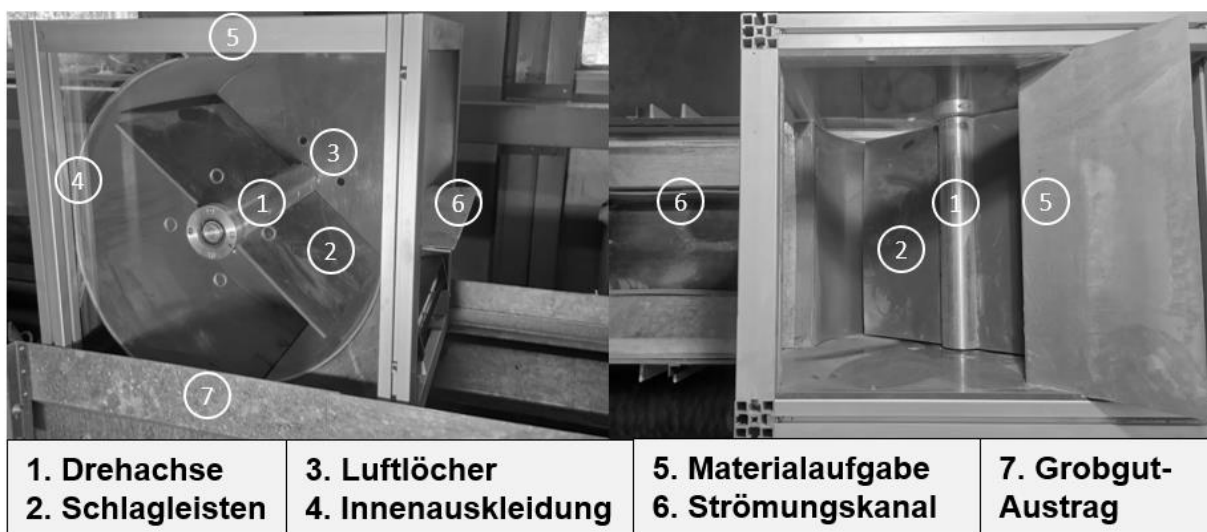


Abbildung 19: Fotografische Darstellung der Dispergiereinheit in einer Seitenansicht (links) und einer Ansicht von oben (rechts)

Die Dispergiereinheit befindet sich unterhalb der Aufgabeeinheit (5). Der Fallschacht ist dabei ein Teil der Aufgabeeinheit. Im Dispergierraum wird das Aufgabegut von zwei an einer Welle (1) befestigten, mit einer Drehzahl n rotierenden Schlagleisten (2) erfasst und in den angrenzenden Strömungskanal (6) geschleudert. Die Welle wird durch einen Motor angetrieben. Die Dispergiereinheit ist mit Luftlöchern (3) und einer Innenauskleidung (4) versehen, die ihrer Funktion als Strömungserzeuger dienen. Über die

Luftlöcher wird axial Luft eingesaugt und über die Innenauskleidung wird die Strömung gelenkt. Am unteren Ende der Dispergiereinheit befindet sich ein Grobgutaustrag (7), durch welchen Körnungen, die nicht wie vorgesehen von der Dispergiereinheit erfasst werden, ausgetragen werden können. Abbildung 20 stellt den Aufbau der Dispergiereinheit und die wesentlichen Parameter schematisch dar:

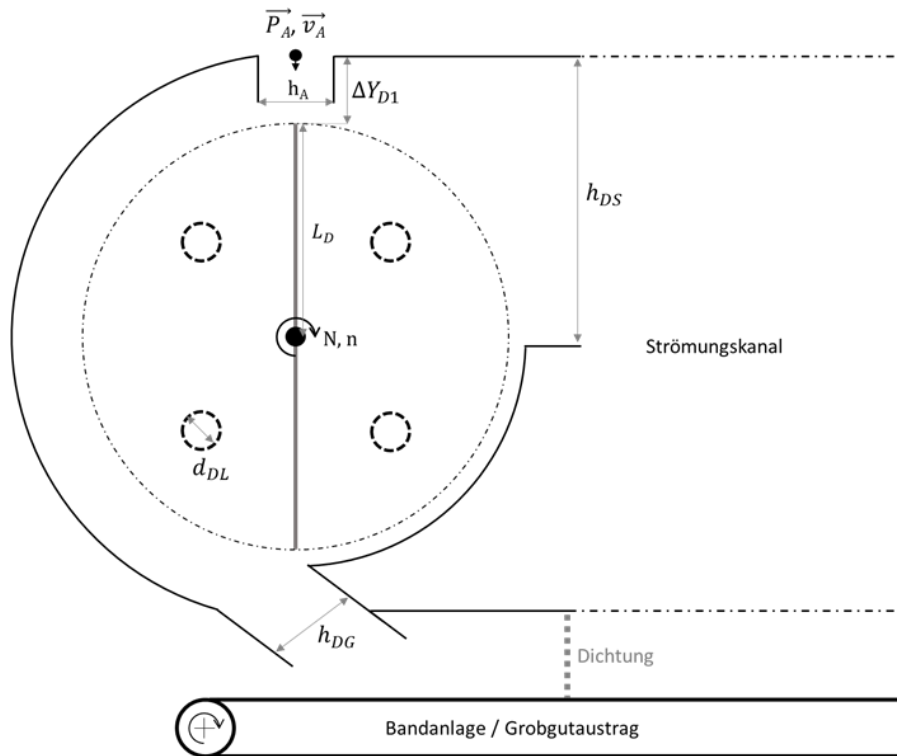


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Dispergiereinheit

Die Dispergiereinheit besteht aus einer mit einer Drehzahl n rotierenden Welle, auf welcher N Schlagleisten, im Fall der Untersuchungen sind es 2 Schlagleisten, befestigt sind. Die Schlagleisten verfügen über eine Länge L_D und eine Breite b , die der Breite des Klassierers entspricht. Das Aufgabegut wird in einem vertikalen Abstand zur Drehachse von ΔY_{D1} aufgegeben. Der Förderstrom weist dabei eine Geschwindigkeit v_{Ay} und eine Breite von h_A auf. Der Schwerpunkt dieses Förderstroms liegt direkt vertikal über der Drehachse und ist durch den Punkt \vec{P}_A gekennzeichnet. Die Drehachse der Dispergiereinheit wird für sämtliche Berechnungen und Beschreibungen als Zentrum des Koordinaten- bzw. Bezugssystems verwendet. Neben der Öffnung zur Materialaufgabe, welche luftdicht verschlossen ist, weist die Dispergiereinheit weitere Öffnungen auf. Diese dienen dem Einsaugen und dem Ausblasen von Luft. Die Luft wird dabei seitlich über mehrere Luftlöcher mit einem Durchmesser d_{DL} eingesaugt und in den Strömungskanal, welcher über eine Höhe von h_{DS} verfügt, geblasen. Des Weiteren

befindet sich eine Öffnung am unteren Ende der Dispergiereinheit, welche einen Grob-
gutaustrag darstellt. Diese Öffnung verfügt über eine Höhe von h_{DG} . Das „D“ in den
Parameterbezeichnungen steht für die Dispergiereinheit. Die Funktionalität der Disper-
giereinheit wird in den nachfolgenden Unterkapiteln anhand ihrer drei Aufgaben detail-
liert erläutert.

Funktionsweise der Dispergiereinheit als Strömungserzeuger

Eine der drei Aufgaben der Dispergiereinheit ist die Erzeugung einer Luftströmung
durch die Rotation der Schlagleisten. Dieser Abschnitt beschreibt die Funktionsweise
bei der Strömungserzeugung zunächst anhand von physikalischen Zusammenhängen
und stellt anschließend Ergebnisse aus Laboruntersuchungen zur Validierung dieser
Zusammenhänge vor. Hierbei sollen, ausgehend von der Drehzahl n und der Dimen-
sionierung der Dispergiereinheit, der Luftvolumenstrom \dot{V}_{DS} und die Luftgeschwindig-
keit v_{DS} am Anfang des Strömungskanals sowie der Energiebedarf zur Strömungser-
zeugung P_{DS} ermittelt werden. Diese Größen stellen die Grundlage zur Dimensionie-
rung des Strömungskanals und zur Bestimmung der Energieeffizienz des Klassierers
dar.

Physikalische Grundlage der Strömungserzeugung

Die Dispergiereinheit gleicht in ihrer Funktion als Strömungsgeber einem Radiallüfter.
Die Luft wird axial (parallel zur Antriebsachse) eingesaugt, durch die Rotation der
Schlagleisten umgelenkt und radial in den Strömungskanal geblasen. Der schemati-
sche Aufbau der Dispergiereinheit bezogen auf ihre Funktion als Strömungserzeuger
ist in Abbildung 21 dargestellt:

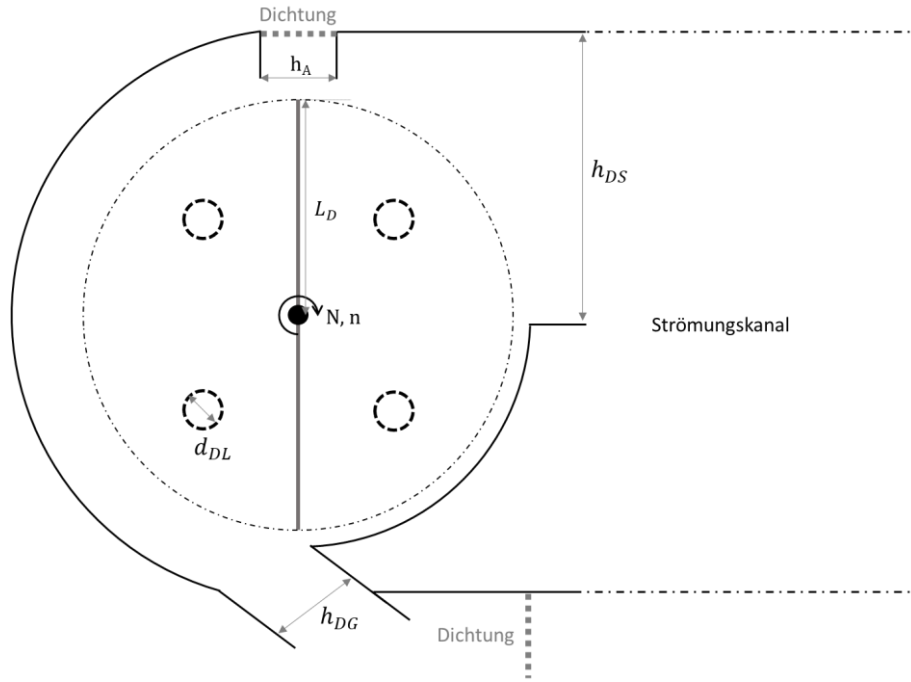


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Dispergiereinheit als Strömungserzeuger

Die Luft wird durch je vier Luftlöcher auf beiden Seiten des Klassierers mit einem Durchmesser d_{DL} angesaugt und durch die mit einer Drehzahl n rotierenden Schlagleisten mit einer Länge L_D (und einer Anzahl N) in den Strömungskanal geblasen. Die Luftströmung \dot{V}_{DS} wird durch die Rotation der Schlagleisten erzeugt. Dabei ist das bewegte Luftvolumen pro Umdrehung von Bedeutung. Dieses entspricht einem Zylinder mit einer Höhe, die der Breite der Dispergiereinheit b entspricht, und einer Grundfläche, deren Radius die Länge der Schlagleisten L_D ist. Anhand dieser Größen berechnet sich das pro Zeiteinheit bewegte Luftvolumen wie folgt:

$$\dot{V}_{DS} = b \pi L_D^2 N n \quad (14)$$

Die Innenauskleidung des Dispergierraums ist so gestaltet, dass die eingesaugte Luft möglichst komplett in den Strömungskanal geleitet wird. Gemäß dem Kontinuitätsprinzip entspricht der eingesaugte Luftvolumenstrom dem ausgeblasenen Luftvolumenstrom. Was das System betrifft, wird die Luft in den Strömungskanal geblasen und kann über die Luftlöcher an den Seiten des Systems eingesaugt werden. Für die Volumenströme lässt sich daher folgende Gleichung aufstellen:

$$\dot{V}_{DS} \approx \dot{V}_{DL} = v_{DS} b h_{DS} \approx N_{DL} \pi v_{DL} \frac{d_{DL}^2}{4} \quad (15)$$

Wobei \dot{V}_{DS} die Strömung in den Strömungskanal und \dot{V}_{DL} die summierte Strömung durch alle Luftlöcher ist. Die Anzahl der Luftlöcher ist als N_{DL} gekennzeichnet und beträgt bei den Laboruntersuchungen 8 Stück. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Strömungskanal wird als v_{DS} und die mittlere Geschwindigkeit in den Luftlöchern wird als v_{DL} bezeichnet. Der Strömungskanal weist eine Höhe h_{DS} , und die Luftlöcher weisen einen Durchmesser d_{DL} auf. Zusätzlich zu den Luftlöchern und der Öffnung zum Strömungskanal weist die Dispergiereinheit zwei weitere Öffnungen auf, welche allerdings zum Teil abgedichtet sind und einen derart hohen Strömungswiderstand darstellen, dass diese in ihrer jetzigen Konstellation nicht zur Strömungserzeugung beitragen.

Um die Strömung zu erzeugen, wird Energie benötigt. Diese Energie dient zunächst dazu, die Welle in Rotation zu versetzen. Ist die Welle in Rotation versetzt, so muss Energie aufgewandt werden, um die Rotationsgeschwindigkeit aufrecht zu erhalten, welche durch Reibung und durch die erzeugte Strömung abgebremst wird. Der Energieverbrauch P_{DS} errechnet sich dabei aus dem Produkt des Strömungsvolumenstrom \dot{V}_{DS} und des Druckverlusts Δp_{DS} , den der Lüfter kompensieren muss. Dieser Druckverlust ist von der Strömungsgeschwindigkeit des Fluids v_{DS} , dem Widerstandsbeiwert ζ und der Dichte des Fluids ρ_f abhängig:

$$\Delta p_{DS} = \frac{1}{2} \zeta \rho_f v_{DS}^2 \quad (16)$$

Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads η der Dispergiereinheit lässt sich der Energiebedarf der Dispergiereinheit zur Strömungserzeugung wie folgt ermitteln:

$$P_{DS} = \frac{1}{2} \frac{\zeta}{\eta} \rho_f b h_{DS} v_{DS}^3 \quad (17)$$

Da zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und dem Energieverbrauch ein hyperbolischer Zusammenhang besteht und da die Strömungsgeschwindigkeit linear mit der Drehzahl der Dispergiereinheit korreliert, muss folglich auch ein hyperbolischer Zusammenhang zwischen der Drehzahl und dem Energieverbrauch bestehen:

$$\dot{V}_{DS} = v_{DS} b h_{DS} \sim n \sim \sqrt[3]{P_{DS}} \quad (18)$$

Labortechnische Betrachtung der Strömungserzeugung

Dieser Abschnitt stellt die Ergebnisse der Laboruntersuchungen der Strömungsverhältnisse vor und überprüft dabei die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Zusammenhänge zwischen der Drehzahl, dem Luftvolumenstrom und dem Energieverbrauch der Dispergiereinheit im Sinne der Strömungserzeugung. Die Dimensionen der Dispergiereinheit der Laboranlage sind in Tabelle 6 aufgelistet:

Symbol	Bezeichnung	Wert	Einheit
N	Anzahl der Schlagleisten	2	-
n	Drehzahl	13,4	1/s
L_D	Länge der Schlagleisten	0,225	m
b	Breite des Systems	0,4	m
h_{DS}	Weite der Öffnung zum Strömungskanal	0,22	m
h_{DG}	Weite der Öffnung zum Grobgutaustrag	0,1	m
h_A	Weite der Öffnung zur Materialaufgabe	0,04	m
d_{DL}	Durchmesser der Luftlöcher	0,02	m
N_{DL}	Anzahl der Luftlöcher	8	-

Tabelle 6: Dimensionierung der Dispergiereinheit als Strömungserzeuger: Ausgangsparameter

Die Drehzahl der Dispergiereinheit der Laboranlage lässt sich stufenlos regeln. Der Regler lässt dabei Einstellungen E_D von „0“ bis „1000“ zu. Die entsprechenden Drehzahlen sind in Relation zu diesen Einstellungen gemessen worden. Dabei ist folgender linearer Zusammenhang mit einem Korrelationsindex von 0,9998 festgestellt worden:

$$n \approx 0,0445 E_D + 0,0395 \quad (19)$$

Bei einer maximalen Drehzahleinstellung lässt sich so eine Drehzahl von ca. 44,5 Umdrehungen pro Sekunde erzielen.

Aufbauend auf die Untersuchung der Drehzahl in Relation zur Einstellung ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v_{DS} am Übergang zum Strömungskanal bei verschiedenen Drehzahlen gemessen worden. Die Strömungsgeschwindigkeit ist mit einem Hitzdraht-Anemometer an den Ecken, Kanten und im Zentrum der Kanalöffnung gemessen worden. Die insgesamt neun Messwerte sind für die Ermittlung des Volumenstroms gemittelt worden. Die Luftströmung ist dabei tendenziell an den Seiten der Kanalöffnung und im oberen Bereich des Kanals höher gewesen, als im Zentrum und im unteren Bereich. Die Untersuchungen zur Ermittlung der Strömungsprofile sind im Anhang „Anhang 11: Untersuchungen der Strömungsprofile“ dargestellt.

Zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und der Drehzahl ist folgender linearer Zusammenhang festgestellt worden:

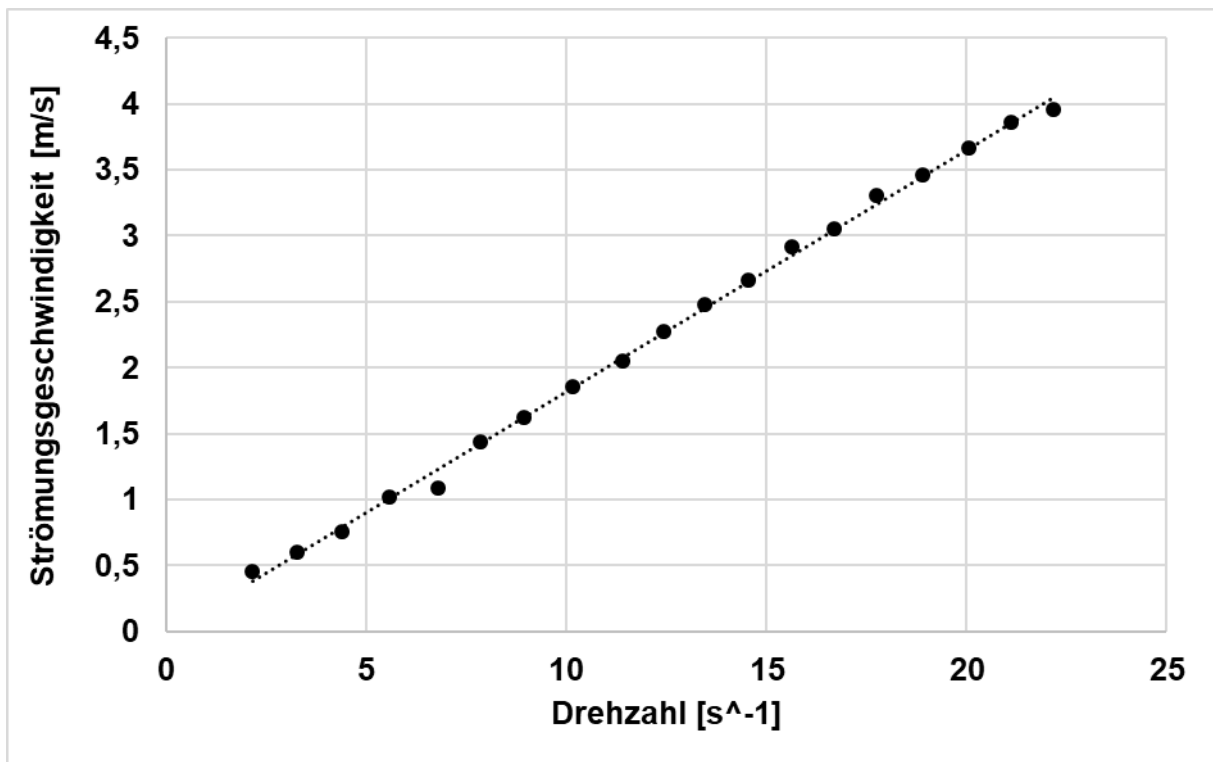


Abbildung 22: Zusammenhang zwischen der Drehzahl der Dispergiereinheit und der Strömungsgeschwindigkeit

Dieser lineare Zusammenhang lässt sich mit einem Korrelationsindex von 0,99 wie folgt beschreiben:

$$v_{DS} \approx 0,183 n \quad (20)$$

Den theoretischen Berechnungen zufolge ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$v_{DS} \sim \frac{b \pi L_D^2 N n}{b h_{DS}} = \frac{\pi L_D^2 N n}{h_{DS}} \approx 1,4 n[m] \quad (21)$$

Beide Gleichungen weisen einen linearen Zusammenhang nach. Die theoretisch mögliche Luftgeschwindigkeit ist allerdings 7,65-mal so groß wie die tatsächliche Geschwindigkeit. Daraus ergibt sich für die Bestimmung der Luftgeschwindigkeit ein empirischer Korrekturfaktor F_{DS} von 1/7,65. Dieser Unterschied ist auf Strömungswiderstände und eine nicht perfekte Lenkung der Strömung zurückzuführen. Gerade die axial angeordneten Luftlöcher verfügen über einen kleinen Durchmesser und stellen so einen hohen Strömungswiderstand dar. So ist es dem System nicht möglich, die theoretisch maximale Luftströmung zu erzeugen.

Diese Luftströmung muss über die Luftlöcher an den Seiten des Systems eingesaugt werden, bevor sie durch die Öffnung zum Strömungskanal geblasen werden kann. Dabei ist die Fläche des Strömungskanals bei der Laboranlage ca. 35-mal so groß wie die kumulierte Fläche der Luftlöcher. Gemäß dem Kontinuitätsprinzip muss die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in den Luftlöchern folglich ca. 35-mal so hoch sein wie die Strömungsgeschwindigkeit im Strömungskanal. Diese Annahme ist durch die Messung der eingehenden und ausgehenden Luftvolumenströme bei verschiedenen Drehzahlen bestätigt worden.

Die Messergebnisse sind in Abbildung 23 dargestellt. In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die gemessenen ausgehenden Strömungen, den eingehenden Strömungen bei verschiedenen Drehzahlen entsprechen:

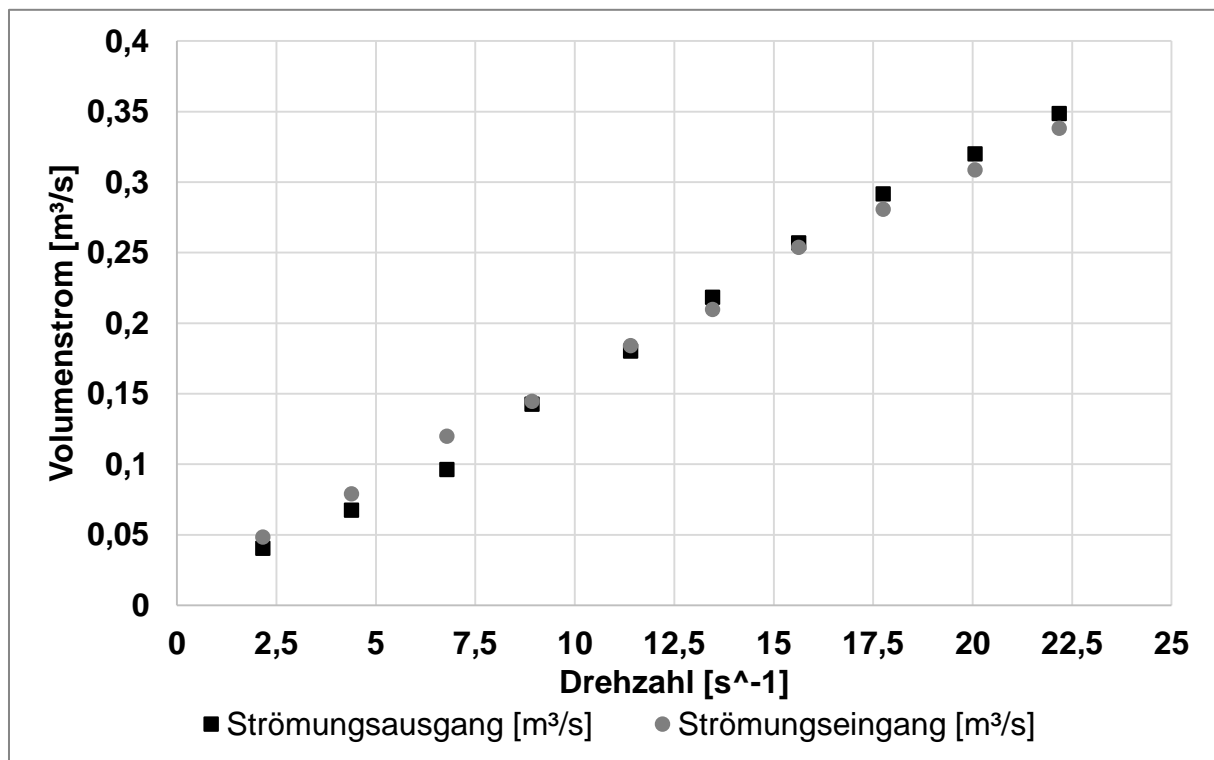


Abbildung 23: Eingehende und ausgehende Luftvolumenströme der Dispergiereinheit

Zur Strömungserzeugung wird Energie benötigt. Der Energiebedarf zur Strömungserzeugung ist durch die Messung der elektrischen Leistung der Dispergiereinheit bei unterschiedlichen Drehzahlen ermittelt worden. Hierbei lässt sich ein hyperbolischer Zusammenhang zwischen der Leistung und der Drehzahl feststellen, welcher durch folgende empirische Gleichung beschrieben wird:

$$P_{DS} = 0,0243 n^3 + 0,0094 n^2 + 2,9 n + 37,555 \quad (22)$$

Die mit einem Korrelationsindex von $R = 0,992$ korrelierenden Messwerte sind in Abbildung 24 dargestellt:

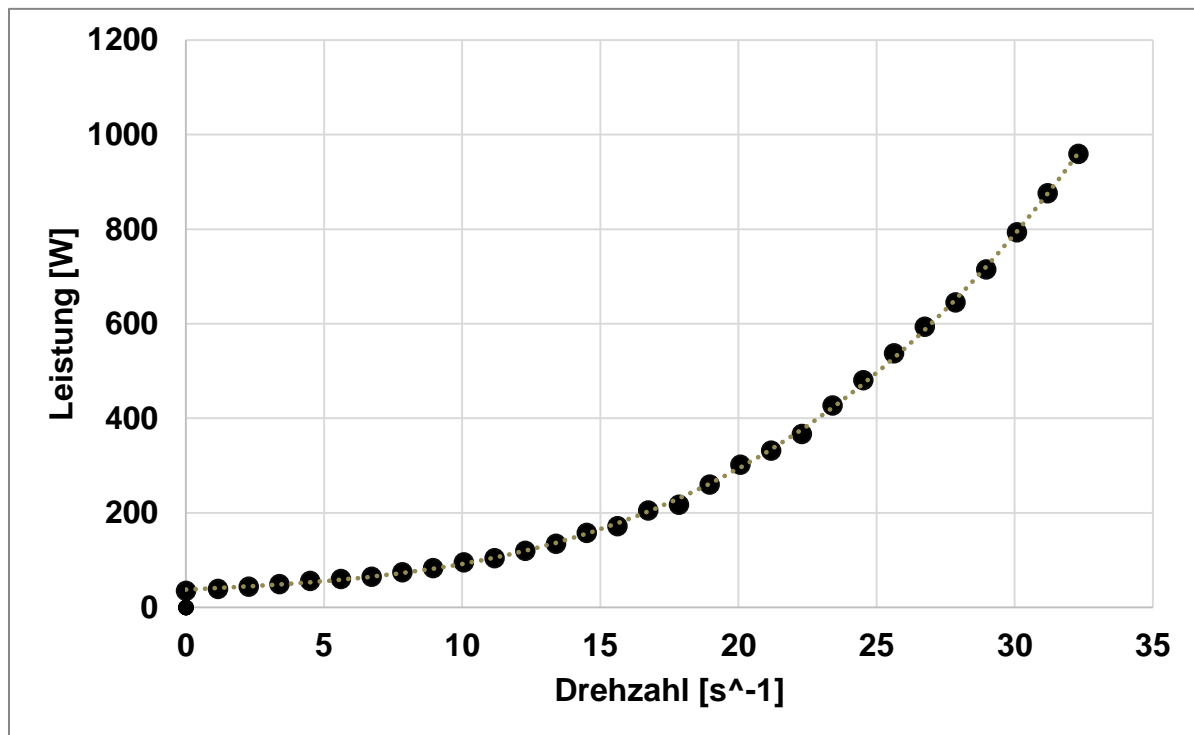


Abbildung 24: Korrelation zwischen der Stromaufnahme (Leistung) und Drehzahl der Dispergiereinheit

Der Zusammenhang zwischen der Leistung und der Strömungsgeschwindigkeit lässt sich ebenfalls durch eine hyperbolische Funktion beschreiben:

$$P_{DS} \approx 18,27 v_{DS}^3 + 0,774 v_{DS}^2 + 26,44 v_{DS} + 37,6 \quad (23)$$

Der theoretische Zusammenhang zwischen der Leistung und der Strömungsgeschwindigkeit ist der folgende:

$$P_{DS} = \frac{1}{2} \frac{\zeta}{\eta} \rho_{fL} b h_{DS} v_{DS}^3 \approx \frac{\zeta}{\eta} 0,044 |v_{DS}|^3 \quad (24)$$

Wobei ρ_{fL} in diesem Fall nur die Dichte von Luft ist, welche als 1 kg pro m³ angenommen worden ist.

Die im Labor gemessenen Werte stimmen mit den theoretischen Annahmen bei einem Quotienten aus dem Strömungswiderstandsbeiwert und dem Wirkungsgrad (ζ / η) von ungefähr 102 und einer Starleistung von 37,5 W überein. Bei diesem Quotienten könnte z. B. ein Wirkungsgrad η von ca. 0,35 und einem Strömungswiderstandsbei-

wert ζ von ca. 36 vorhanden sein. Ein solcher Strömungswiderstandsbeiwert ist dennoch sehr hoch. Unter Berücksichtigung des Strömungswiderstandsbeiwerts, des Wirkungsgrads und der Startleistung ist die theoretische Leistung zur Strömungserzeugung gemessen worden und mit der im Labor ermittelten Leistung verglichen worden. Der Zusammenhang dieser Werte ist in Abbildung 25 dargestellt:

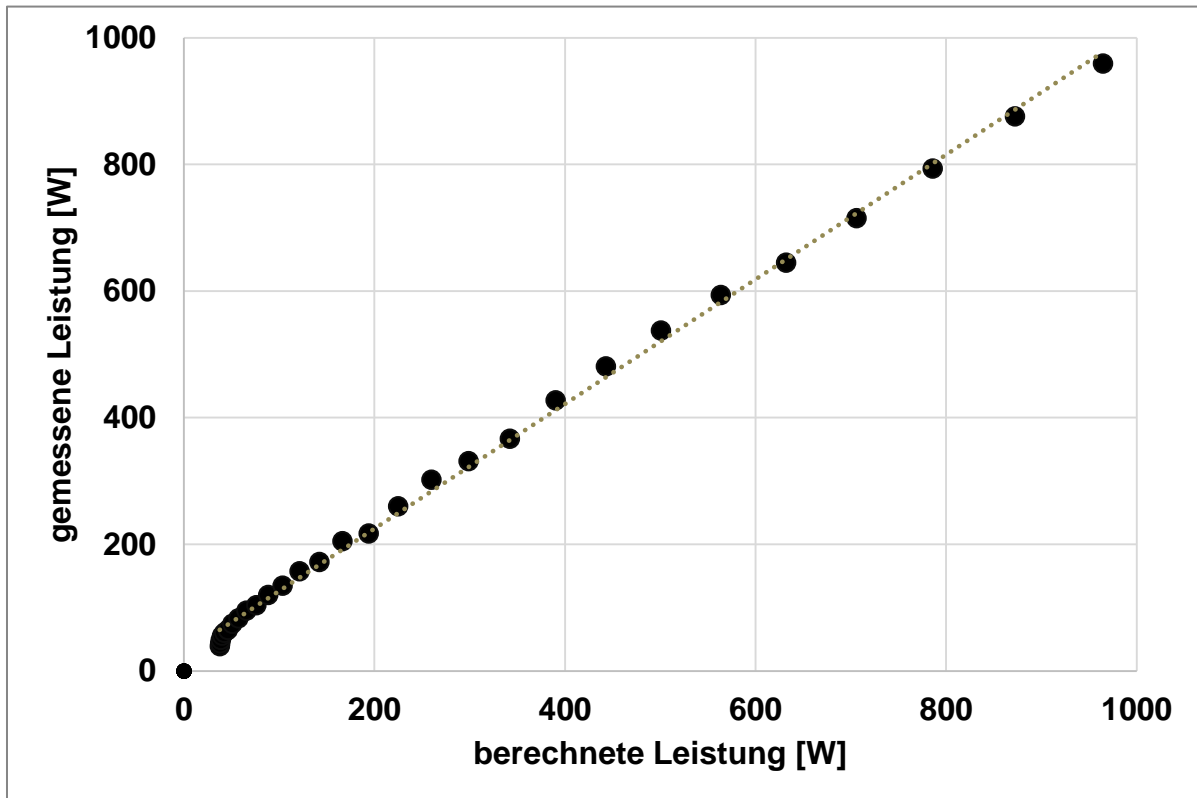


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen theoretisch bestimmter und im Labor gemessener Leistung

Unter den getätigten Annahmen lässt sich eine Korrelationsgerade mit einer Steigung und einem Korrelationsindex von annähernd 1 feststellen. Hierfür ist allerdings ein hoher Strömungswiderstand erforderlich. Dennoch zeigt die Auswertung, dass ein statistischer Zusammenhang zwischen der Leistung und der Geschwindigkeit gemäß den getätigten Annahmen besteht. Ebenso muss angemerkt werden, dass weder die Masse noch das Trägheitsmoment der Schlagleisten, bei der theoretischen Berechnung berücksichtigt wurden.

Die bisher dargelegten Untersuchungen beziehen sich nur auf den erzeugten Luftvolumenstrom an der Öffnung zum Strömungskanal. Der Strömungskanal ist bei den Untersuchungen entfernt worden und hat so keinen Strömungswiderstand dargestellt. Der Strömungswiderstand, der vom Strömungskanal ausgeht, bewirkt, dass der Druck-

unterschied, der durch den Dispergiereinheit ausgeglichen muss, bei gleicher Drehzahl und Stromabnahme zunimmt. Infolgedessen wird weniger Luft von der Dispergiereinheit axial eingesaugt. Der Strömungswiderstand nimmt mit der Kanallänge zu und die erzeugte Strömung nimmt folglich ab. Diese Strömungsreduzierung kann durch eine hyperbolische Funktion beschrieben werden, welche durch Messungen im Labor mit einem Korrelationsindex von 0,99 wie folgt bestimmt worden ist:

$$\Delta \dot{V}_{DS\%} \approx (8,73 L_S^3 + 20,26 L_S^2 + 0,18 L_S + 0,21)\% \quad (25)$$

Hieraus lässt sich ein längenabhängiger Strömungswiderstandsbeiwert ζ des Strömungskanals von $2,9 \text{ m}^{-1}$ ableiten. Bedingt durch diesen Strömungswiderstand reduziert sich die erzeugte Strömung unter Berücksichtigung des Strömungskanals bei einer Länge von beispielsweise 1 m um ca. 30 %. Hierbei wird allerdings die Strömung, die von der Absauge-Einheit erzeugt wird, nicht berücksichtigt.

Zusammenfassung der Funktion der Dispergiereinheit als Strömungserzeuger

Durch die Rotation der mit Schlagleisten versehenen Welle werden Luftmassen in Bewegung versetzt und eine Strömung wird erzeugt. Die Strömungsuntersuchungen erfolgten nur im Leerlauf der Anlage ohne die Verwendung von Klassiergut. Die gemessene Strömung ist schräg nach oben gerichtet. Vergleicht man die theoretisch mögliche Strömung mit der gemessenen Strömung, so lässt sich eine Diskrepanz mit einem Faktor von ca. 7,65 feststellen. Diese Diskrepanz resultiert aus Strömungswiderständen insbesondere beim Einsaugen der benötigten Luftströmung und durch eine nicht-optimale Führung der Strömung. Die Strömungsgeschwindigkeit bei den jeweiligen Luftlöchern muss 35-mal so groß sein wie die Strömung im Strömungskanal.

Der starke Einfluss des Strömungswiderstands auf die Strömungserzeugung macht sich auch bei der Ermittlung des Energieverbrauchs zur Strömungserzeugung bemerkbar. Die theoretischen Annahmen stimmen bei der Ermittlung des Energieverbrauchs ebenfalls mit den im Labor ermittelten Messwerten überein. Allerdings muss hierbei ein hoher Strömungswiderstandsbeiwert von ca. 36 berücksichtigt werden. Dieser Wert lässt sich auf Basis der getätigten Annahmen und der Ergebnisse der Laboruntersuchungen bei einem Wirkungsgrad der Dispergiereinheit von ca. 0,35 berechnen. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass die Rotationsenergie der Schlagleisten vernachlässigt worden ist, was zu diesem hohen Wert beitragen kann. Eine weitere

Reduzierung des erzeugten Volumenstroms geht von dem Strömungskanal aus. Dieser weist einen längenabhängigen Strömungswiderstandsbeiwert von ca. $2,9 \text{ m}^{-1}$ auf, was einer Reduzierung der erzeugten Strömung von ca. 30 % bei einer Kanallänge von 1 m entspricht. Die Strömung nimmt hyperbolisch mit einer Zunahme der Strömungswiderstände ab.

Eine Reduzierung der Strömungswiderstände ist für die Optimierung der Funktion der Dispergiereinheit als Strömungserzeuger unabdingbar. Hierbei sind insbesondere der Strömungseinzug, das Leiten der Strömung in der Dispergiereinheit und das Ausblasen der Strömung in den Strömungskanal von Bedeutung. Der Strömungswiderstand beim Einsaugen der Luftströmung kann z. B. durch ein größeres, sich bei der Drehachse befindendes Luftloch oder durch einen weiteren Lufteinzug unter der Dispergiereinheit reduziert werden. Das Leiten der Strömung kann z. B. durch eine optimierte Innenauskleidung, welche keine Kanten aufweist und unkontrolliertes Zirkulieren der Luftströmung vermeidet, optimiert werden. Der Strömungswiderstand beim Ausblasen der Strömung in den Strömungskanal geht maßgeblich vom Strömungskanal aus. Dieser ist bei der Laboranlage in verschiedenen Modulen aufgebaut gewesen. Durch die modulare Bauweise weist er kein ebenes Strömungsprofil auf, was den Strömungswiderstand erhöht. Folglich sollte das Profil des Strömungskanals bei einem industriellen Einsatz ausgetauscht werden.

Die Optimierung der Strömungsverhältnisse lässt eine wesentliche Effizienzsteigerung bei der Strömungserzeugung erwarten, welche für die Dimensionierung des Sichters von großer Bedeutung ist. Für diese sind insbesondere der Luftvolumenstrom \dot{V}_{DS} und die Luftgeschwindigkeit v_{DS} sowie der Energiebedarf P_{DS} in Abhängigkeit der Drehzahl n relevant. Diese Parameter liefern die Basis zur Bestimmung der Energieeffizienz des Klassierers und der Strömungsverhältnisse im Strömungskanal.

Funktionsweise der Dispergiereinheit als Impulsgeber

Eine weitere Aufgabe der Dispergiereinheit ist es, die Partikelkollektive in den Strömungskanal zu befördern. Dies wird infolge des Impulses, welchen die Partikel bei der Kollision mit den rotierenden Schlagleisten erfahren, gewährleistet. Dieser Impuls ist von folgenden Parametern abhängig:

- Der Position der Partikel beim Eintritt in die Dispergiereinheit. Diese wird durch den Mittelpunkt des Aufgabemassenstroms \mathbf{P}_A und die Breite des Massenstroms \mathbf{h}_A beschrieben. Die Partikel befinden sich beim Eintritt in den Dispergierraum in einer Höhe von \mathbf{h}_{DG} und in einem horizontalen Abstand zur Drehachse von bis zu $\pm \frac{\mathbf{h}_A}{2}$.
- Der vertikalen Komponente der Geschwindigkeit des Aufgabeguts beim Eintritt in die Dispergiereinheit \mathbf{v}_{Ay} . Die horizontale Komponente wird vernachlässigt, da diese durch den Fallschacht ausgebremst wird.
- Der Drehzahl \mathbf{n} der Drehachse und Anzahl \mathbf{N} der an der Drehachse befestigten Schlagleisten.
- Der Länge der Schlagleisten \mathbf{L}_D .

Im Folgenden wird die Funktionsweise der Dispergiereinheit als Impulsgeber anhand einiger theoretischer Zusammenhänge vorgestellt, welche anschließend auf die Laboranlage angewandt werden.

Physikalische Grundlage der Funktion als Impulsgeber

Beim Fallen in die Dispergiereinheit werden die Partikel durch die Gravitation beschleunigt, bis diese von den Schlagleisten erfasst werden. Dabei sind zwei Zeitpunkte zu berücksichtigen. Diese sind der Zeitpunkt, wenn die Partikel in den Wirkungsbereich der Dispergiereinheit, d. h. den Umfangskreis der Rotation der Schlagleisten, eintreten und der Zeitpunkt, wenn die Partikel ihre maximale Falltiefe erreichen, bei welcher das gesamte Partikelkollektiv von den Schlagleisten erfasst wird. Die Punkte an den sich die Partikel zu beiden Zeitpunkten befinden, sind in Abbildung 26 als \mathbf{P}_{D1} und \mathbf{P}_{D2} dargestellt.

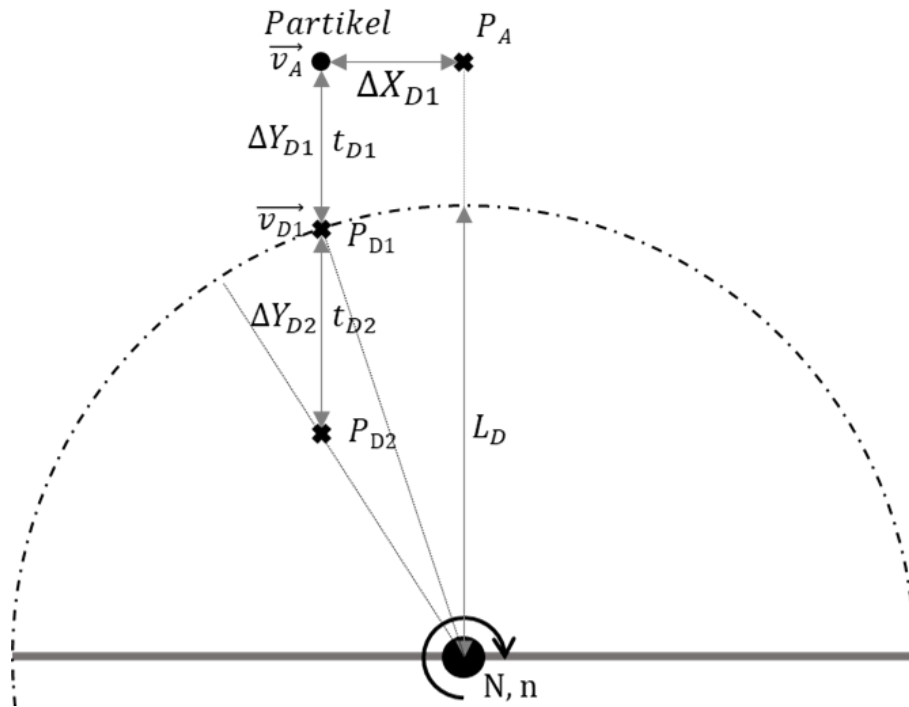


Abbildung 26: Schematische Darstellung der Dispergiereinheit für die Fallbewegung der Partikel im Wirkungsbereich der Dispergiereinheit

Abbildung 26 zeigt einen Teil des Massenstroms, der in einem horizontalen Abstand ΔX_{D1} von P_A mit einer Geschwindigkeit v_{Ay} in den Dispergierraum eintritt. Bezogen auf die Drehachse der Dispergiereinheit, welche als Zentrum des Referenzkoordinatensystems gilt, befindet sich P_A in einem horizontalen Abstand von 0 und einem vertikalen Abstand von $L_D + \Delta Y_{AD}$ zur Drehachse. Wobei L_D die Länge der Schlagleisten und ΔY_{AD} der fixe vertikale Abstand zwischen P_A und dem Wirkungsbereich der Dispergiereinheit ist. Der horizontale Abstand ΔX_{D1} des jeweiligen Partikels von P_A muss sich in den Grenzen von $\pm \frac{h_A}{2}$ befinden. Die Breite dieses Massenstroms wird für die folgenden Betrachtungen vernachlässigt bzw. als genau eine Partikelbreite angenommen. Von der Materialaufgabe fallen die Partikel vertikal herunter, bis diese in den Wirkungsbereich der Dispergiereinheit eintreten. Dieser ist durch einen gestrichelten Kreisumfang gekennzeichnet. Für die Partikelbewegung werden nur eine Startgeschwindigkeit in vertikaler Richtung und eine Beschleunigung in vertikaler Richtung aufgrund der Gravitation berücksichtigt. Reibungswiderstände werden vernachlässigt.

Der Eintrittspunkt der Partikel P_A in den Wirkungsbereich der Dispergiereinheit ist von der Länge der Schlagleisten sowie der horizontalen Koordinate des Materialeintritts abhängig. Dabei gilt:

$$P_{D1} = \begin{pmatrix} P_{D1x} \\ P_{D1y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{D1} \\ \sqrt{L_D^2 - X_{D1}^2} \end{pmatrix} \quad (26)$$

Bis zu diesem Punkt werden die Partikel durch die Erdbeschleunigung beschleunigt und bewegen sich mit einer Geschwindigkeit v_{D1} , wobei:

$$v_{D1} = g t_{D1} + v_{Ay} \quad (27)$$

Die Falltiefe ΔY_{D1} berechnet sich aus der Differenz der Y-Koordinate des Schwerpunkts der Materialaufgabe ($L_D + \Delta Y_{AD}$) und der Y-Koordinate von P_{D1} :

$$\Delta Y_{D1} = L_D + \Delta Y_{AD} - \sqrt{L_D^2 - X_{D1}^2} = v_{Ay} t_{D1} + \frac{g t_{D1}^2}{2} \quad (28)$$

Aus dieser Gleichung lässt sich die Fallzeit t_{D1} bestimmen, wodurch sich für die Geschwindigkeit v_{D1} Folgendes ergibt:

$$v_{D1} = \frac{-v_{Ay} + \sqrt{v_{Ay}^2 + 2g \Delta Y_{D1}}}{g} g + v_{Ay} = \sqrt{v_{Ay}^2 + 2g \Delta Y_{D1}} \quad (29)$$

Der Punkt P_{D1} markiert die obere Grenze des Partikelstroms, der von den Schlagleisten erfasst werden kann. Die untere Grenze P_{D2} gestaltet sich in Abhängigkeit der maximalen Falltiefe im Wirkungsbereich der Dispergiereinheit ΔY_{D2} und der Länge der Schlagleisten L_D sowie der horizontalen Startposition. Generell lässt sich die Koordinate der unteren Wurfgränze wie folgt beschreiben:

$$P_{D2} = \begin{pmatrix} \Delta X_{D1} \\ \sqrt{L_{DS}^2 - \Delta X_{D1}^2} - \Delta Y_{D2} \end{pmatrix} \quad (30)$$

Wobei ΔY_{D2} von der Fallzeit t_{D2} , in der die Partikel diese Distanz zurückzulegen, und von der durchschnittlichen Geschwindigkeit der Partikel beim Zurücklegen dieser Distanz abhängt. Die maximal mögliche Fallzeit t_{D2} entspricht der Zeit, die zwischen den jeweiligen Kollisionen der Schlagleisten mit den Partikelkollektiven vergeht. Diese Zeit ist von der Drehzahl n und der Anzahl der Schlagleisten N abhängig und berechnet sich wie folgt:

$$t_{D2} = \frac{1}{Nn} \stackrel{!}{=} \frac{\Delta Y_{D2}}{\frac{v_{D1} + v_{D2}}{2}} \quad (31)$$

Wobei v_{D2} die Geschwindigkeit der Partikel am Punkt \mathbf{P}_{D2} , also nach zurückgelegten Weg ΔY_{D2} , ist. Für diese folgt in Abhängigkeit zu t_{D2} :

$$v_{D2} = gt_{D2} + v_{D1} = \frac{g}{Nn} + v_{D1} \quad (32)$$

Es folgt für ΔY_{D2} :

$$\Delta Y_{D2} = \frac{v_{D1} + v_{D2}}{2 N n} + \frac{g}{2 N^2 n^2} = \frac{v_{D1} + \frac{g}{Nn}}{N n} \quad (33)$$

Damit das Partikelkollektiv vollständig mit einer möglichst hohen Geschwindigkeit und möglichst gezielt in den Dispergierraum geworfen werden kann, sollte ΔY_{D2} möglichst klein sein. In Anlehnung an die Dimensionierung der Materialaufgabe und die Länge der Schlagleisten L_D kann eine für den Wurf der Partikel minimal notwendige Drehzahl n_{krit} bestimmt werden. Diese orientiert sich daran, dass die Partikel im oberen Bereich der Schlagleisten erfasst werden. Dieser Bereich kann in Relation zur Länge der Schlagleisten durch den Faktor F_{krit} beschrieben werden. Ein Faktor von 50 % würde z. B. bedeuten, dass die Partikel immer von mindestens der oberen Hälfte der Schlagleisten erfasst werden. Für die Berechnung der Mindest-Drehzahl gilt folgender Zusammenhang:

$$\Delta Y_{D2} \stackrel{!}{=} F_{krit} L_D = \frac{v_{D1} + \frac{g}{Nn_{krit}}}{N n_{krit}} \quad (34)$$

Hieraus lässt sich für die Mindest-Drehzahl n_{krit} folgendes ableiten:

$$n_{krit} = \frac{v_{D1} + \sqrt{v_{D1}^2 + 4 g F_{krit} L_D}}{2 N L_D F_{krit}} \quad (35)$$

Zwischen den Wurfgrenzen \mathbf{P}_{D1} und \mathbf{P}_{D2} werden die Partikel bei einer gleichmäßigen Materialaufgabe gleichmäßig von den Schlagleisten erfasst. Die Impulse, die aus der Kollision mit den Schlagleisten resultieren, sind dabei von der Position der Partikel bei der Kollision abhängig. Diese Position gibt an, an welcher Stelle die Schlagleiste L_{Di}

mit den Partikeln kollidiert und in welchem Drehwinkel α_{Di} sich die Schlagleiste dabei befindet. Die Stärke (der Betrag) des Impulses $\overrightarrow{I_{Di}}$ berechnet sich unter Berücksichtigung der Partikelmasse m_P wie folgt:

$$\frac{|\overrightarrow{I_{Di}}|}{m_P} = L_{Di} 2\pi n \quad (36)$$

Zum besseren Verständnis sind die Dispergiereinheit und die relevanten Parameter schematisch in Abbildung 27 dargestellt:

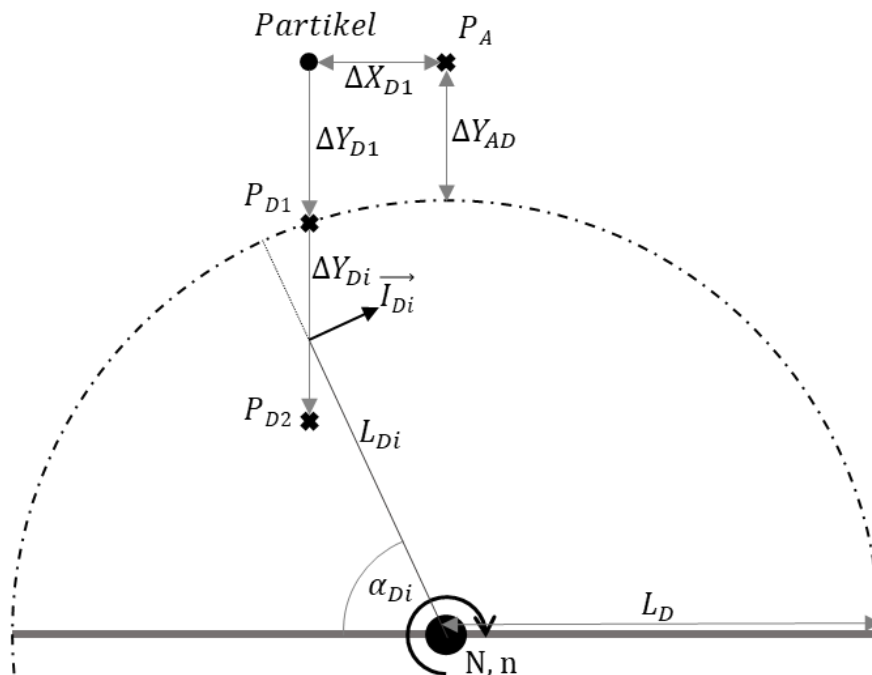


Abbildung 27: Schematische Darstellung der Dispergiereinheit für den Impuls, welchen die Partikel bei Kollision mit der Dispergiereinheit erfahren

Der Drehwinkel α_{Di} sowie der Abstand L_{Di} zu dem Punkt auf der Schlagleiste, an welcher diese mit den Partikeln kollidiert, gehen aus der Grafik hervor. L_{Di} errechnet sich dabei in Abhängigkeit der jeweiligen vertikalen Position $\Delta Y_{D1} + \Delta Y_{Di}$ und horizontalen Position ΔX_{D1} der Partikel im Wirkungsbereich der Dispergiereinheit. P_{D1} und P_{D2} geben dabei die Grenzbereiche an, zwischen welchen die Partikel erfasst werden müssen. L_{Di} kann auch als effektive Länge der Schlagleisten betrachtet werden, da L_{Di} die Länge repräsentiert, die für die Stärke des Impulses verantwortlich ist. L_{Di} errechnet sich dabei gemäß dem Satz des Pythagoras wie folgt:

$$L_{Di} = \sqrt{\Delta X_{D1}^2 + \left(\sqrt{L_D^2 - \Delta X_{D1}^2} - \Delta Y_{Di} \right)^2} \quad (37)$$

Wobei

$$\Delta Y_{Di} = v_{D1} t_{Di} + \frac{g t_{Di}^2}{2} \quad (38)$$

Hierbei ist t_{Di} die entsprechende Fallzeit des Partikels im Wirkungsbereich der Dispergiereinheit. Diese kann, je nach Position der Schlagleiste beim Eintritt in den Wirkungsbereich, zwischen 0 s und $\frac{1}{n_n}$ s liegen. Die Koordinate P_i , an welcher die Partikel mit der Dispergiereinheit kollidieren, berechnet sich wie folgt:

$$P_i = \left(\frac{\Delta X_{D1}}{\sqrt{L_{DS}^2 - \Delta X_{D1}^2} - \Delta Y_{Di}} \right) \quad (39)$$

Wobei ΔY_{Di} in einem Bereich zwischen P_{D1} und P_{D2} liegt. Der Drehwinkel α_{Di} bei der Kollision zwischen einer Schlagleiste und dem Partikelkollektiv lässt sich aus denselben Parametern wie die effektive Länge der Schlagleisten L_{Di} bestimmen:

$$\alpha_{Di} = \arctan \left(\frac{\sqrt{L_D^2 - \Delta X_{D1}^2} - (\Delta Y_{D1} + \Delta Y_{Di})}{\Delta X_{D1}} \right) = \arccos \left(\frac{\Delta X_{D1}}{L_{Di}} \right) \quad (40)$$

Die Richtung des Impulses ist senkrecht zur Richtung der Schlagleisten bzw. parallel zur Drehrichtung der Dispergiereinheit. Der Impulsvektor errechnet sich auf Basis des Drehwinkels α_{Di} wie folgt:

$$\vec{I}_{Di} = |\vec{I}_{Di}| \begin{pmatrix} \cos(\alpha_{Di} + 90^\circ) \\ \sin(\alpha_{Di} + 90^\circ) \end{pmatrix} = |\vec{I}_{Di}| \begin{pmatrix} \sin \alpha_{Di} \\ -\cos \alpha_{Di} \end{pmatrix} \quad (41)$$

Daraus folgt für die Geschwindigkeit \vec{v}_{Di} , die gemäß dem Impulserhaltungssatz auf die Partikel übertragen wird:

$$\vec{v}_{Di} = 2\pi n L_{Di} \begin{pmatrix} \sin \alpha_{Di} \\ -\cos \alpha_{Di} \end{pmatrix} \quad (42)$$

Anhand der Berechnungen der Partikelgeschwindigkeiten und Positionen lässt sich unter Vernachlässigung des Luftwiderstands folgende Bewegungsgleichung für die Partikel bestimmen:

$$P_D(t) = \left(\begin{array}{c} \Delta X_{D1} + t \sin \alpha_{Di} 2\pi n L_{Di} \\ \left(\sqrt{L_{DS}^2 - \Delta X_{D1}^2} - \Delta Y_{Di} \right) - t (\cos \alpha_{Di} 2\pi n L_{Di} + g t_{Di} + v_{D1}) - \frac{1}{2} g t^2 \end{array} \right) \quad (43)$$

Diese Bewegungsgleichung liefert die Grundlage für die Wurfbahnen der Partikel im Strömungskanal. Diese werden in Kapitel 5.3 beschrieben.

Die Geschwindigkeit, die auf die Partikel durch den Impuls übertragen wird, verleiht den Partikeln eine kinetische Energie. Diese Energie wird durch den Antrieb der Welle erzeugt. In Relation zum Massenstrom lässt sich aus der kinetischen Energie der Partikel folgender Energiebedarf P_{DW} ableiten:

$$P_{DW} \eta \approx \dot{M} |\vec{v}_{DP}|^2 \quad (44)$$

Dieser Energiebedarf addiert sich zu dem Energiebedarf, der zur Strömungserzeugung notwendig ist.

Labortechnische Betrachtung der Funktion als Impulsgeber

In diesem Unterkapitel werden die im vorherigen Abschnitt präsentierten Gleichungen auf die Laboranlage angewandt. Dabei sollen die Positionen und die Geschwindigkeit der Partikel bei und unmittelbar nach der Kollision mit den Schlagleisten bestimmt werden. Ebenso soll eine Abschätzung des für das Werfen der Partikel notwendigen Energiebedarfs erfolgen. Die Dimensionierung der Laboranlage bzw. die Größe der Parameter, die für die Berechnungen notwendig sind, ist in Tabelle 7 aufgelistet:

Symbol	Bezeichnung	Wert			Einheit	Formel/Kommentar
Ausgangsparameter						
\dot{M}	Massenstrom	2,98			kg/s	Abhängig von α_A
v_A	Veritkale Aufgabegeschwindigkeit	0,11			m/s	Abhängig von α_A
P_{Ax}	Horizontale Aufgabeposition	-0,02	0	0,02	m	Im Bereich von $\pm 0,5$ ha
h_A	Höhe des Aufgabeguts	0,04				(Weite der Fallhose)
P_{Ay}	Vertikale Aufgabeposition	0,3			m	$P_{ay} = \Delta Y_{AD} + L_D$
ΔY_{AD}	Vertikaler Abstand von P_A zum Wirkungsbereich der Schlagleisten	0,075			m	Entspricht ungefähr 0,33 L_D
L_D	Länge der Schlagleisten	0,225			m	
N	Anzahl der Schlagleisten	2			-	
n	Drehzahl	13,4			1/s	variabel
b	Breite der Anlage	0,4			m	Abhängig von der Bandanlage
η	Wirkungsgrad der Dispergiereinheit	0,7			-	nicht genau bestimmbar
Materialeigenschaften und Konstanten						
g	Erdbeschleunigung	9,81			m/s ²	

Tabelle 7: Dimensionierung der Dispergiereinheit als Impulsgeber: Ausgangsparameter

Die Parameter der Materialaufgabe, wie deren Position, Höhe und die vertikale Aufgabegeschwindigkeit sowie der Massenstrom sind beispielhaft genauso gewählt worden, wie es in Kapitel 5.1. beschrieben worden ist. Die Schlagleisten der Dispergiereinheit sind 22,5 cm lang, und der Abstand zwischen der Drehachse und der Materialaufgabe beträgt 30 cm. Gemäß der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Gleichungen sind die Zielparameter für drei verschiedene horizontale Aufgabepositionen berechnet worden. Diese drei Positionen liegen an den äußeren Grenzen und in der Mitte des Förderstroms. Anhand dieser drei Positionen lassen sich für die Grenzbereiche P_{D1y} und P_{D2y} verschiedenen Koordinaten und Partikelgeschwindigkeiten ableiten. Ebenso lassen sich die auftretenden Impulse berechnen. Die berechneten Zielparameter sind in Tabelle 8 dargestellt:

Symbol	Bezeichnung	Wert			Einheit	Formel/Kommentar
Zielparameter						
P _{Dx}	Horizontale Position der Partikel	-0,02	0	0,02	m	P _{Dx} = ΔX _{Di}
P _{D1y}	Vertikale Position beim Eintritt in den Wirkungsbereich	0,224	0,225	0,224	m	P _{D1y} = (L _D ² - ΔX _{D1} ²) ^{0,5}
v _{D1}	Geschwindigkeit bei P _{D1}	1,225	1,218	1,225	m/s	v _{D1} = (v _{Ay} ² - 2 g ΔY _{D1} ²) ^{0,5}
P _{D2y}	Vertikale Position bei max. Falltiefe	0,165	0,166	0,165	m	P _{D2y} = P _{D1y} - (N n v _{D1} + g) / (N ² n ²)
v _{D2}	Geschwindigkeit bei P _{D2}	1,591	1,584	1,591	m/s	v _{D2} = g / (N n) + v _{D1}
α _{D1}	Drehwinkel der Schlagleiste bei P _{D1}	95,1	90	84,9	°	α _{D1} = arccos (ΔX _{D1} / L _{D1})
L _{D2}	Effektive Schlagleistenlänge bei P _{D2}	0,166	0,166	0,166	m	L _{D2} = (P _{D2y} ² - ΔX _{D1} ²) ^{0,5}
α _{D2}	Drehwinkel der Schlagleiste bei P _{D2}	96,92	90	83,08	°	α _{D2} = arccos (ΔX _{D2} / L _{D2})
v _{D1x}	Horizontale Geschwindigkeit nach dem Impuls bei P _{D1}	18,87	18,94	18,87	m/s	v _{D1x} = 2 π n L _{D1} sin α _{Di}
v _{D1y}	Vertikale Geschwindigkeit nach dem Impuls bei P _{D1}	0,459	-1,218	-1,225	m/s	v _{D1y} = - 2 π n L _{D1} cos α _{Di} -v _{Di}
v _{D2x}	Horizontale Geschwindigkeit nach dem Impuls bei P _{D2}	13,87	13,97	13,87	m/s	v _{D1x} = 2 π n L _{D1} sin α _{Di}
v _{D2y}	Vertikale Geschwindigkeit nach dem Impuls bei P _{D2}	0,093	-1,584	-1,591	m/s	v _{D1y} = - 2 π n L _{D1} cos α _{Di} -v _{Di}
v _{DP}	Durchschnittliche Geschwindigkeit der Partikel aufgrund der Impulse	12,47			m/s	

Tabelle 8: Dimensionierung der Dispergiereinheit als Impulsgeber: Zielparameter

Unter diesen Einstellungen unterscheiden sich die Strömungsgeschwindigkeiten in horizontaler Richtung kaum. Bei einer Drehzahl von 13,4 Umdrehungen pro Sekunde liegt die horizontale Geschwindigkeitskomponente bei minimal 13,87 m/s und bei maximal 13,97 m/s. Was die vertikale Geschwindigkeitskomponente betrifft, so sind diese Unterschiede größer. Partikel, die sich rechts von der Drehachse befinden, erfahren eine nach unten gerichtete Geschwindigkeit von bis zu 1,68 m/s. Bei Partikeln, die sich links von der Drehachse befinden, ist diese Geschwindigkeit nach oben gerichtet. Auf Höhe der Drehachse beträgt die vertikale Geschwindigkeitskomponente der Schlagleisten 0. In der Tabelle sind die Fallgeschwindigkeiten für die vertikale Bewegungskomponente zu der Umfangsgeschwindigkeit der Schlagleisten addiert worden und unterscheidet sich daher von diesen Werten. Die minimal notwendige Drehzahl, um die Partikel mit den oberen 50 % der Schlagleisten zu erfassen, liegt bei der Laboranlage bei ca. 8,1 Umdrehungen pro Sekunde.

Der Energiebedarf der Dispergiereinheit ist von der Drehzahl und dem Massenstrom abhängig. Im vorherigen Unterkapitel ist die Funktionsweise der Dispergiereinheit als Strömungserzeuger beschrieben worden. Der Energiebedarf zur Strömungserzeugung konnte unter der Berücksichtigung eines hohen Strömungswiderstands bestimmt werden. Der Energiebedarf zur Strömungserzeugung ist dabei nur von der Drehzahl

der Dispergiereinheit anhängig. Der theoretische, durch die empirisch ermittelten Messergebnisse angepasste Zusammenhang lässt sich wie folgt vereinfacht zusammenfassen:

$$P_{DS} \approx 0,0272 n^3 + 37,6 W \quad (45)$$

Für den Wurf der Partikel ist die theoretisch erforderliche Energie unter der Annahme berechnet worden, dass die Dispergiereinheit beim Aufprall auf die Partikel einen Impuls bewirkt, der gemäß dem Impulserhaltungssatz die komplette Aufprallgeschwindigkeit auf die Partikel überträgt. Die dafür benötigte Energie wird gemäß der Annahme durch den Antrieb der Dispergiereinheit ausgeglichen. Dieser Zusammenhang berechnet sich wie folgt:

$$P_{DW} \approx 1,91 \frac{n^2 \dot{M}}{\eta} \quad (46)$$

Der Energiebedarf der Dispergiereinheit P_D bestimmt sich aus der Summe der Energie, die für den Wurf der Partikel und für die Strömungserzeugung benötigt wird:

$$P_D = P_{DS} + P_{DW} \approx 0,018 n^3 + \frac{1,91 \dot{M} n^2}{\eta} + 37,6 W \quad (47)$$

Die berechnete Leistung ist mit der gemessenen Leistung bei verschiedenen Drehzahlen und Massenströmen korreliert worden. Die Korrelation weist bei einem Wirkungsgrad des Antriebs η von 0,35 einen Korrelationsindex von 0,96 und eine Steigung der Korrelationsgeraden von annähernd 1 auf. Dabei ergibt sich folgender Zusammenhang:

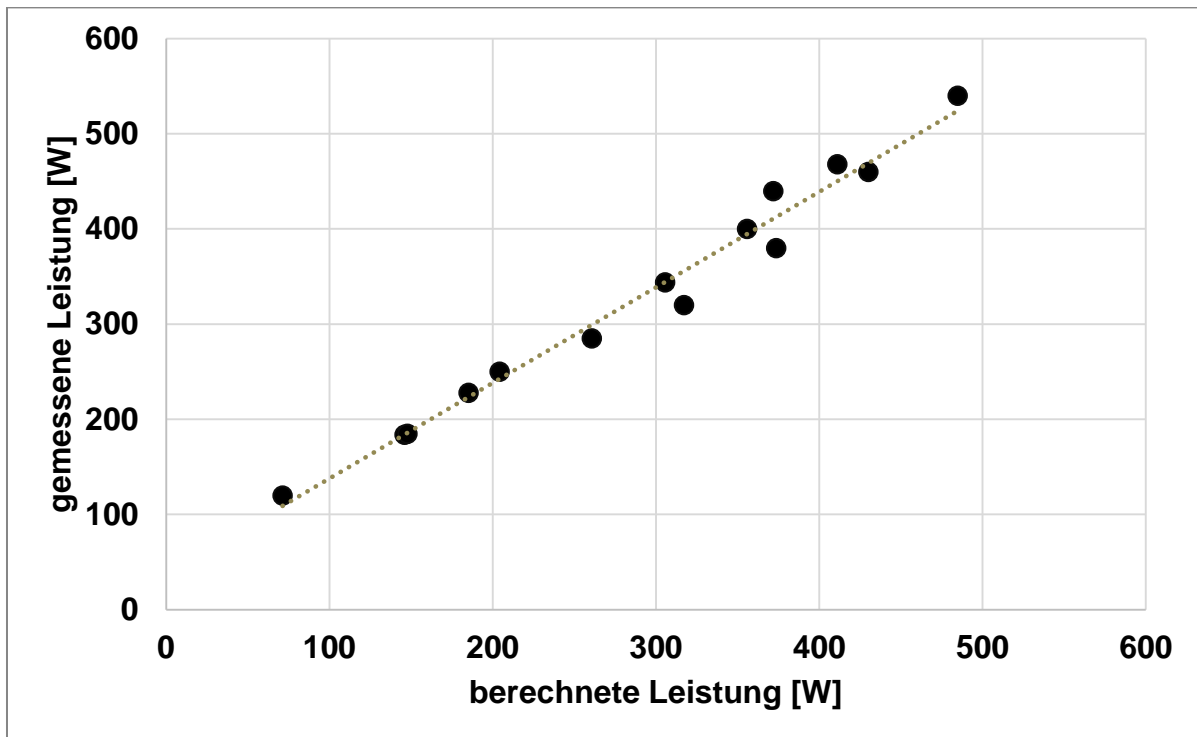


Abbildung 28: Zusammenhang zwischen gemessener und berechneter Leistung der Dispergiereinheit (Wurf + Strömung)

Unter der Berücksichtigung des Energieverbrauchs zur Strömungserzeugung, der Startleistung und des empirisch bestimmten Wirkungsgrads ergibt sich für die Leistung der Dispergiereinheit P_D folgende, vereinfachte Gleichung:

$$P_D \approx 0,018 n^3 + 5,457 \dot{M} n^2 + 37,6 W \quad (48)$$

Die Gleichungen verknüpfen den theoretisch angenommenen und den im Labor gemessenen Energieverbrauch. Der tatsächliche Energieverbrauch lässt sich auf Basis der theoretischen Annahmen ziemlich genau bestimmen. Der Energiebedarf der Dispergiereinheit beträgt bei einer Drehzahl von 13,4 Umdrehungen pro Sekunde und einem Durchsatz von 3 t/h ca. 330W.

Zusammenfassung der Funktion als Impulsgeber

Die Dispergiereinheit wirft das Grobgut infolge des Impulses, der beim Aufprall der Partikel auf die Schlagleisten entsteht, in den Strömungskanal. Für die resultierenden Wurfbahnen sind insbesondere die Position der Materialaufgabe und die Partikelgeschwindigkeit beim Eintritt in die Dispergiereinheit von Bedeutung. Die Partikel werden infolge des Impulses auf die Umfangsgeschwindigkeit der Schlagleisten beschleunigt. Die hierfür benötigte Energie wird von einem Antrieb generiert. Der Energiebedarf lässt sich auf Basis der wirkenden Impulse berechnen. Diese Berechnungen weisen eine hohe Übereinstimmung mit den im Labor bestimmten Messwerten auf.

Aus den Laboruntersuchungen lassen sich einige Verbesserungspotenziale für eine industriell genutzte Anlage ableiten. Diese beziehen sich zunächst auf die Materialaufgabe, welche eine möglichst geringe Weite aufweisen und möglichst nah an der Drehachse liegen sollte. Des Weiteren sollten die Schlagleisten möglichst lang sein. Je größer die Länge der Schlagleisten ist, desto größer ist auch die übertragene Geschwindigkeit und desto geringer ist die unerwünschte vertikale Geschwindigkeitskomponente infolge des Impulses. Dies kann ebenfalls durch eine Erhöhung der Drehzahl gewährleistet werden. Zwischen der Drehzahl und der Länge der Schlagleisten lässt sich gemäß (35) ein Zusammenhang herstellen. Generell ist hierbei allerdings anzumerken, dass sowohl der Energiebedarf als auch die Bauhöhe bei einer Erhöhung der Länge der Schlagleisten zunehmen, wohingegen eine Erhöhung der Drehzahl nur in einem erhöhten Energiebedarf resultiert. Der dritte wesentliche Optimierungsansatz bezieht sich auf das Material der Schlagleisten. Diese bestehen bei der Laboranlage aus Hartplastik. Dieses verformt sich im Zuge der mechanischen Beanspruchung bei der Klassierung. Nach ca. 400 Tests bzw. einer Aufgabe von ca. 3 t ist bereits eine leichte Verformung an den Seiten zu erkennen. Bei einem Einsatz in der Industrie stellen die Schlagleisten Verschleißteile dar, die regelmäßig gewechselt werden müssen. Diese sollten aus möglichst verschleißbeständigem Material, z. B. Hartmetall, bestehen und so aufgebaut sein, dass sich diese möglichst schnell und unkompliziert austauschen lassen.

Funktionsweise der Dispergiereinheit als Dispergiermaschine

Die dritte Funktion der Dispergiereinheit ist das Dispergieren des Partikelkollektivs. Dieses dient dazu, die Partikel im Klassierraum zu verteilen und die Körnungen voneinander zu trennen. Dabei sollen ebenfalls Agglomerate aufgelöst werden. So soll ermöglicht werden, dass das Feinstgut in Suspension mit der Fluidströmung geht, während die größeren Körnungen maßgeblich durch den Impuls geworfen werden.

Der Dispergiermechanismus lässt sich im Gegensatz zur Strömungserzeugung bzw. zum Wurfmechanismus nicht genau anhand von Messgrößen beziffern. Prinzipiell hängt die Dispergierung von Kräften ab, die die Partikel voneinander lösen und verteilen. Gemäß dem Stand der Technik sind dies meist Scherkräfte durch Luftströmungen, Zentrifugalkräfte oder Gravitationskräfte bei einer Nutzung von Formwiderständen. Bei der Dispergiereinheit der Neuentwicklung wirken die zu Dispergierung erforderlichen Kräfte infolge der Kollision zwischen dem Partikelkollektiv und den Schlagleisten schlagartig auf die Partikel ein. Diese Kräfte, hier als F_{DD} beziffert, lassen sich in Abhängigkeit des Durchsatzes \dot{M} und der Geschwindigkeit der Schlagleisten beim Aufprall v_{Di} mit den Partikeln wie folgt abschätzen:

$$F_{DD} \approx \dot{M} v_{Di} \approx \dot{M} \pi n L_{Di} \quad (49)$$

Scherkräfte, die durch eine Luftströmung erzeugt werden, oder Zentrifugalkräfte, die aus der Rotation eines Streutellers resultieren, sind generell geringer als die durch Schlag erzeugten Kräfte innerhalb der Dispergiereinheit. Basierend auf der Annahme, dass die Fähigkeit, Agglomerate zu lösen und das Aufgabegut zu verteilen, auf der Stärke und Art der wirkenden Kräfte beruht, kommt die Dispergiereinheit ihrer Funktion nach.

Neben der Kraft- bzw. Impulserzeugung, die maßgeblich auf der Länge der Schlagleisten und der Drehzahl beruht, spielt die Größe des Klassierers und Dispergierraums eine entscheidende Rolle. Diese gibt den Raum an, in dem sich das dispergierte Feinstgut verteilen kann, und ist somit ein für die Gutbeladung entscheidender Faktor. Der zylinderförmige Dispergierraum verfügt über einen Radius, welcher der Länge der Schlagleisten L_D plus dem Abstand zwischen dem Wirkungsbereich der Dispergiereinheit und der Innenauskleidung ΔL_{DD} entspricht. Dieser Abstand entspricht bei der La-

boranlage ungefähr einem Drittel der Länge der Schlagleisten. Die Höhe dieses Zylinders entspricht der Breite des Klassierers **b**. Das Volumen des Dispergierraums **V_D** berechnet sich demnach wie folgt:

$$V_D = b \pi (\Delta L_{DD} + L_D)^2 \approx b \pi \left(\frac{4}{3} L_D \right)^2 \quad (50)$$

Generell gilt, je größer der Dispergierraum ist, desto größer ist die zulässige Gutbeladung. Insofern lässt sich feststellen, dass sich die Funktionalität der Dispergiereinheit generell mit einer zunehmenden Länge der Schlagleisten erhöht. Allerdings nehmen dabei auch der Energiebedarf und die Baugröße zu. In weiteren Untersuchungen muss ermittelt werden, inwiefern ein Abstand zwischen dem Wirkungsbereich der Dispergiereinheit und der Innenauskleidung **ΔL_{DD}** notwendig ist. Durch eine Reduzierung dieses Abstands könnte die Baugröße reduziert werden, allerdings würde sich dabei auch der Dispergierraum verkleinern.

5.3 Funktionsweise des Strömungskanals

Nachdem das Aufgabegut dispergiert worden ist, gelangt es in den Strömungskanal. Dabei wird das Grobgut von der Dispergiereinheit geworfen, wohingegen das Feingut gemeinsam mit dem Fluid in den Strömungskanal strömt. Der Strömungskanal stellt den Klassierraum des Sichters dar. In diesem soll sich das Grobgut am Boden ablagern, von wo es durch eine Bandanlage zum Grobgutaustrag gelangt. Das Feingut hingegen, soll gemeinsam mit der Fluidströmung über eine Absaugung am Ende des Strömungskanals zum Feingutaustrag gelangen. Der Strömungskanal des Schlagleisten-Querstromsichters ist in Abbildung 29 schematisch dargestellt:

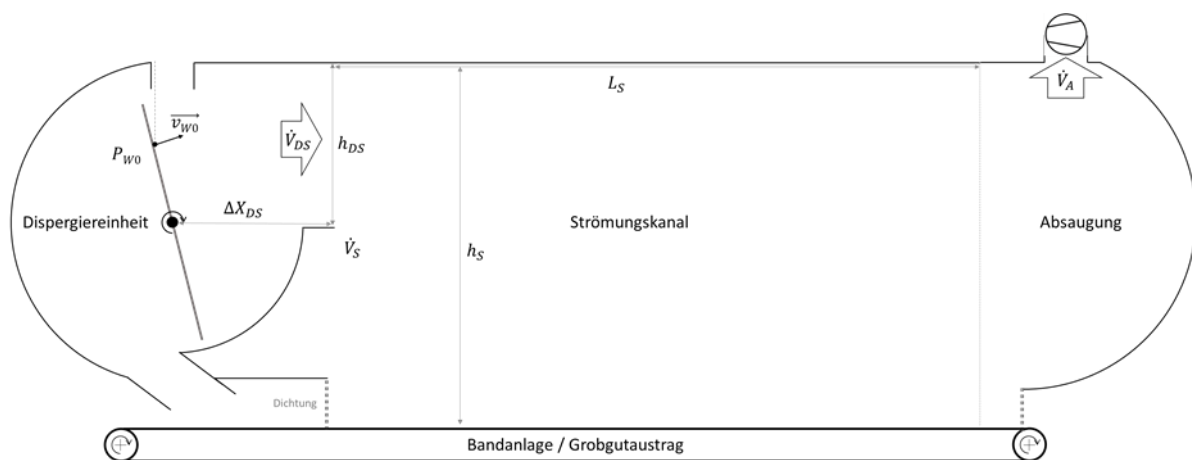


Abbildung 29: Schematische Darstellung des Klassierers mit einem Fokus auf dem Strömungskanal

Die Dispergiereinheit stellt den Ausgangspunkt für die Wurfbahnen des Grobguts und für die Strömung dar. Sie erzeugt durch die Rotation der Schlagleisten eine Luftströmung \dot{V}_{DS} mit einer Strömungsgeschwindigkeit v_{DS} in der Öffnung zum Strömungskanal. Das Grobgut wird an der Position P_{W0} von den Schlagleisten der Dispergiereinheit erfasst. Im Zuge des Impulses weisen die Partikel an dieser Stelle eine Geschwindigkeit $\overrightarrow{v_{W0}}$ auf. Das Zentrum der Dispergiereinheit, die Drehachse, befindet sich in einem horizontalen Abstand ΔX_{DS} zur Öffnung des Strömungskanals. Die Öffnung ist h_{DS} hoch und 8 cm in vertikaler Richtung von der Drehachse entfernt. Nach der Öffnung weitet sich der Strömungskanal nach unten bis zur Bandanlage aus. Diese Ausweitung ist notwendig, damit die Bandanlage sowohl unter der Dispergiereinheit als auch unter dem Strömungskanal durchführt. Die Höhe und Länge des Strömungskanals sind als h_S bzw. L_S gekennzeichnet.

Die Strömungen im Strömungskanal werden maßgeblich von der Dispergiereinheit und von der Absauge-Einheit erzeugt. Die Strömung der Absauge-Einheit weist an der Öffnung des Absauge-Kanals eine Geschwindigkeit von v_A auf. Der Strömungskanal der Laboranlage ist in Abbildung 30 fotografisch dargestellt:

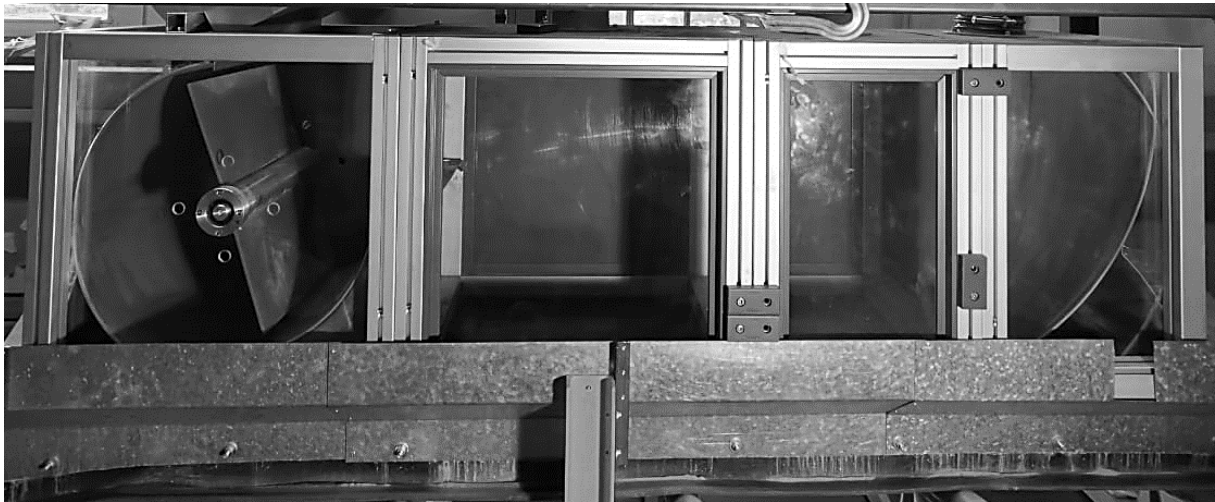


Abbildung 30: Fotografische Darstellung des Klassierers mit einem Fokus auf dem Strömungskanal

Der Strömungskanal der Laboranlage besteht aus mehreren Segmenten mit einer jeweils unterschiedlichen Länge (20 cm, 40 cm oder 60 cm) und endet mit einem gekrümmten Profil mit einer Länge von ca. 30 cm. So lässt sich die Länge des Strömungskanals variabel in 20 cm-Schritten von 0,3 m bis zu 1,50 m einstellen und der Einfluss der Länge des Strömungskanals auf die Trennschärfe lässt sich untersuchen. Die Krümmung am Ende des Strömungskanals dient einerseits zur besseren Leitung der Absauge- Strömung, welche zum Feinkornaustrag führt. Andererseits soll die Krümmung dem Abtrennen von Körnungen, welche die Trennkorngröße überschreiten, als Formwiderstand entgegenwirken.

Bei der Beschreibung der Funktionsweise des Strömungskanals wird zwischen dem Grobgut, welches geworfen wird und sich fraktioniert am Boden des Strömungskanals ablegt, und dem sich in der Fluidströmung bewegendem Feingut unterschieden.

Funktionsweise des Strömungskanals: Feingut-Luft-Fluidströmung

Für die Beurteilung der Fluidströmungen im Strömungskanal müssen die verschiedenen Luftströmungen, die damit verbundenen Strömungsgeschwindigkeiten und die Gutbeladung, welche ein wichtiger Parameter für die Trennschärfe eines Klassierprozesses ist, betrachtet werden.

Physikalische Grundlage der Strömung des Feingut-Luft-Fluids

Die Strömung im Strömungskanal setzt sich aus einer hereinströmenden Strömung \dot{V}_{DS} und einer herausströmenden Strömung \dot{V}_A zusammen. Die Strömung \dot{V}_{DS} wird durch die Dispergiereinheit blasend erzeugt, wohingegen die Strömung \dot{V}_A durch einen externen Lüfter saugend erzeugt wird. Die maximal mögliche Strömung setzt sich aus der Summe aller Teilströmungen zusammen:

$$\sum \dot{V}_i = \dot{V}_{DS} + \dot{V}_A = v_{DS} b h_{DS} + v_A \pi \frac{d_A^2}{4} \quad (51)$$

Wobei b die Breite und h_{DS} die Höhe der Öffnung zwischen der Dispergiereinheit und dem Strömungskanal ist, in welcher die Strömung eine mittlere Geschwindigkeit von v_{DS} aufweist. Die beiden weiteren Parameter beschreiben den Durchmesser des Absauge-Kanals d_A und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v_A in diesem.

Dieser theoretische, maximale Volumenstrom lässt sich aufgrund der auftretenden Strömungswiderstände nicht realisieren. Da der Sichter abgedichtet ist, um eine Staubbelastung zu vermeiden, kann die Strömung nur über die Absauge-Einheit aus dem Klassierraum herausströmen. Diese stellt allerdings aufgrund ihrer Anordnung oberhalb der Kanalkrümmung, senkrecht zur Strömungsrichtung, und durch den geringen Durchmesser einen hohen Strömungswiderstand dar. Um die Strömungswiderstände zu berücksichtigen, wird die Annahme getroffen, dass der Unterdruck, welcher durch die Absauge-Einheit erzeugt wird, lediglich dazu dient, Strömungsverluste aufgrund von Reibung auszugleichen. Für die effektive Strömung im Klassierraum \dot{V}_{ef} ergibt sich so folgender vereinfachter Zusammenhang:

$$\dot{V}_{ef} = \dot{V}_{DS} \stackrel{!}{=} \dot{V}_A \quad (52)$$

Von dieser effektiven Strömung hängt die Gutbeladung $\%G$ bzw. Feststoffbeladung im Klassierraum ab. Die Gutbeladung beschreibt das Verhältnis von Feststoff und Fluid im Sichter. Nimmt die Gutbeladung zu, nehmen auch die Interaktionen zwischen Partikeln zu. In der Folge wird die Luftströmung behindert, die Partikel können nicht mehr ausreichend dispergiert werden und die Trennschärfe nimmt ab. Die Gutbeladung $\%G$ berechnet sich wie folgt:

$$\%_G = \frac{\dot{M}}{\dot{V}_{ef}} \quad (53)$$

Generell gibt es keine allgemeingültige zulässige Gutbeladung. Die zulässige Gutbeladung ist vom Klassierverfahren abhängig und nimmt generell mit der Trennkorngröße und mit der Baugröße eines Siebers zu. Heutzutage wird die zulässige Gutbeladung über Simulationen oder Laboruntersuchungen bestimmt [44] [45]. Abbildung 31 stellt die zulässigen Feststoffbeladungen für vier verschiedene zur Entfällung verwendete Sieber in Abhängigkeit vom Durchsatz dar:

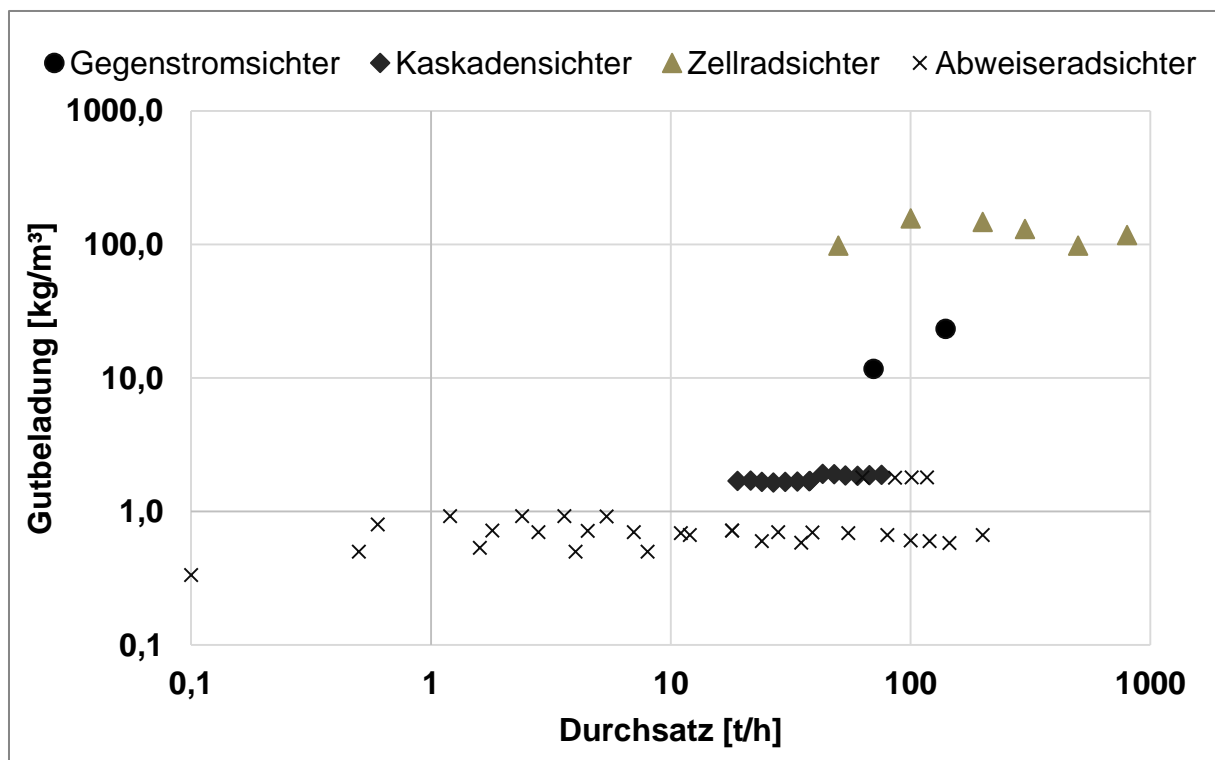


Abbildung 31: Gutbeladungen gängiger Siebtermodele in Abhängigkeit vom Durchsatz [41]

Die zulässigen Gutbeladungen der jeweiligen Sieber sind unabhängig vom Durchsatz, unterscheiden sich aber zwischen verschiedenen Klassierverfahren stark. Die höchstzulässige Gutbeladung mit im Durchschnitt 125 kg Feststoff pro m³ Luft weisen Zellradsichter bzw. Streusichter auf. Etwas geringer ist die zulässige Gutbeladung bei Gegenstromsichtern, welche bei ca. 17,5 kg/m³ liegt. Deutlich geringer ist die zulässige Gutbeladung bei Kaskadensichtern mit ca. 1,8 kg/m³ und bei Abweiseradsichtern mit ca. 0,8 kg/m³. Bei diesen sind größere Bauvolumen und größere Luftmengen erforderlich. Anhand der zulässigen Gutbeladung lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem

Durchsatz, der benötigten Strömung und den Dimensionen des Klassierraums, der Höhe h_s und Breite b , herstellen:

$$\frac{\dot{M}}{\dot{V}_{ef}} = \%_G \sim \frac{1}{v_{ef} h_s b} \sim V_D + V_S = V_D + L_S h_s b \quad (54)$$

Wobei v_{ef} die mittlere effektive Strömungsgeschwindigkeit im Klassierraum ist. V_S beschreibt das Volumen und L_S die Länge des Klassierraums und V_D beschreibt das Volumen des Dispergierraums.

Labortechnische Betrachtung der Strömung des Feingut-Luft-Fluids

Der Strömungskanal der Laboranlage ist wie in Tabelle 9 dargelegt dimensioniert:

Symbol	Bezeichnung	Wert	Einheit	Formel/Kommentar
L_i	Länge des Strömungskanals	1,5	m	variabel von 0,2 m bis 1,2 m
b	Breite des Strömungskanals	0,4	m	Abhängig von der Bandanlage
h_s	Höhe des Strömungskanals	0,6	m	Entspricht ungefähr $2,67 L_D$
V_S	Volumen des Strömungskanals	0,36	m ³	
h_{DS}	Weite der Öffnung zum Strömungskanal	0,22	m	Entspricht ungefähr L_D
v_{DS}	Strömungsgeschwindigkeit in der Kanalöffnung	1,474	m/s	bei $n = 13,4$ Umdrehungen pro s
\dot{M}	Durchsatz	0,83	kg/s	bei $\alpha_A = 36^\circ$

Tabelle 9: Dimensionierung des Strömungskanals bei der Strömung des Feingut-Luft-Fluids: Ausgangsparameter

Anand dieser Dimensionierung und den auftretenden Strömungen lassen sich die Gutbeladung und die effektive Strömung im Klassierraum \dot{V}_{ef} , welche gemäß einer Annahme der Absauge-Strömung \dot{V}_A entspricht, bestimmen. Bei einer Drehzahl von 13,4 Umdrehungen pro Sekunde beträgt der effektive Volumenstrom \dot{V}_{ef} bzw. die notwendige Absauge-Strömung \dot{V}_A ca. 0,13 m³/s. Dabei ist festgestellt worden, dass sich der Luftvolumenstrom, der durch die Dispergiereinheit erzeugt wird, mit zunehmender Distanz auffächert, wobei die Strömungsgeschwindigkeit abnimmt. Um dies zu quantifizieren, sind die Strömungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Abständen und an verschiedenen Messpunkten im Strömungskanal gemessen worden. Die Ergebnisse sind beispielhaft für eine Drehzahl von 13,4 Umdrehungen pro Sekunde in Tabelle 10 dargestellt:

Strömungsgeschwindigkeit [m/s] im Abstand zur Kanalöffnung von:				
	0 cm	20 cm	80 cm	120 cm
Oben	2,07	1,02	0,84	0,50
Mitte	2,51	1,81	1,39	0,67
Unten	0,00	0,46	0,48	0,63
Durchschnitt	1,53	1,10	0,90	0,60

Tabelle 10: Geschwindigkeit der Strömung durch die Dispergiereinheit in Abhängigkeit der Kanallänge

Dabei ist zu erkennen, dass sich die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmenden Abstand zur Kanalöffnung reduziert, weiter nach unten verlagert und homogenisiert. In der Öffnung zum Strömungskanal befindet sich die Strömung ausschließlich in der oberen Hälfte des Strömungskanals, wohingegen sich die Strömungen am Ende des Strömungskanals in einem Abstand von 1,2 m im oberen, mittleren und unteren Bereich beinahe gleichen. Die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit beträgt dort 0,6 m/s. Diese Versuche sind für Drehzahlen von $6,7 \text{ s}^{-1}$, 11 s^{-1} und $15,6 \text{ s}^{-1}$ wiederholt worden. Die Tests weisen vergleichbare Ergebnisse mit Korrelationsindizes zwischen 0,97 und 0,984 auf. Die gemessenen Volumenströme gleichen einander gemäß dem Kontinuitätsprinzip, wobei messbedingte Abweichungen von ca. 10 % aufgetreten sind.

Anhand der effektiven Strömung im Strömungskanal \dot{V}_{ef} lässt sich die Gutbeladung $\%G$ aus dem Quotienten des Durchsatzes \dot{M} und der Strömung \dot{V}_{ef} berechnen. Diese beläuft sich bei einem Durchsatz von ca. 3 t/h auf ca. $6,39 \text{ kg/m}^3$. Diese Gutbeladung liegt zwischen den zulässigen Gutbeladungen Gegenstromsichtern mit ca. $17,5 \text{ kg/m}^3$ und Kaskadensichtern mit ca. $1,9 \text{ kg/m}^3$.

Zusammenfassung der Strömung des Feingut-Luft-Fluids im Strömungskanal

Im Strömungskanal treten zwei Teilströmungen auf. Diese sind die Strömung, die durch die Dispergiereinheit erzeugt wird, und die Absauge-Strömung. Der durch die Absauge-Vorrichtung gebildete Strömungswiderstand ist so groß, dass die Strömung aus dem Kanal nicht ohne einen weiteren Unterdruck in diesen strömen würde. Gemäß diesem Umstand lässt sich die benötigte Absauge-Strömung anhand der Drehzahl der Dispergiereinheit ableiten. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Absauge-Strömung der Strömung der Dispergiereinheit entsprechen muss. Diese Annahme konnte durch die Ergebnisse aus Laboruntersuchungen untermauert werden.

Funktionsweise des Strömungskanals: Fraktionierung des Grobguts

Dieser Abschnitt beschreibt die Wurfbahnen des Grobguts im Klassierraum und erklärt die auftretende Fraktionierung im Strömungskanal. Hierfür werden zunächst die physikalischen Grundlagen, d. h. die Bewegungsgleichungen, vorgestellt.

Physikalische Grundlage der Fraktionierung des Grobguts im Strömungskanal

Die Wurfbahnen der Partikel im Strömungskanal hängen von deren Startposition, Startgeschwindigkeit und den auf die Partikel wirkenden Kräften ab. Diese Kräfte sind die nach unten gerichtete Gravitationskraft und die Strömungswiderstandskraft, die entgegen zur Partikelgeschwindigkeitsrichtung gerichtet ist. Ebenso wirkt eine Auftriebskraft, welche allerdings vernachlässigbar klein ist. Für die Betrachtung der Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Partikel sind zwei Bewegungsrichtungen relevant: die horizontale Bewegung in den Strömungskanal hinein und die vertikale Bewegung. Die allgemeine Bewegungsgleichung lautet wie folgt:

$$P(t) = P_{W0} + \overrightarrow{v_{W0}} t + \overrightarrow{a_W} \frac{t^2}{2} = \begin{pmatrix} P_{0x} \\ P_{0y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{0x} \\ v_{0y} \end{pmatrix} t + \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} \frac{t^2}{2} \quad (55)$$

Die Startposition und Startgeschwindigkeit leiten sich aus den Parametern der Materialaufgabe sowie der Drehzahl n , Anzahl N und Länge der Schlagleisten L_D ab. Bei dem Klassierer gilt für die als P_{W0} bezeichnete Startposition:

$$P_{W0} = \begin{pmatrix} P_{W0x} \\ P_{W0y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X_{D1} \\ \sqrt{L_{DS}^2 - \Delta X_{D1}^2} - \Delta Y_{Di} \end{pmatrix} \quad (56)$$

Wobei ΔX_{D1} die horizontale Position des Partikels bei der Materialaufgabe und ΔY_{Di} die vertikale Position des Partikels beim Aufprall auf die Schlagleisten ist. Das „W“ im Parameterindex steht für „Wurf“ und das „D“ für die Dispergiereinheit, welche den Ausgangspunkt der Wurfbahnen darstellt. Alternativ können die Startgeschwindigkeit und Startposition auch als P_{W0} und v_{W0} bezeichnet werden. Die vertikale Position hängt neben der Dimensionierung der Dispergiereinheit auch von der Aufgabegeschwindigkeit $\overrightarrow{v_A}$ der Partikel ab. Für die Startgeschwindigkeiten $\overrightarrow{v_{W0}}$ der Partikel gilt:

$$\overrightarrow{v_{W0}} = \begin{pmatrix} v_{W0x} \\ v_{W0y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \alpha_{Di} \, 2\pi n \, L_{Di} \\ -\cos \alpha_{Di} \, 2\pi n \, L_{Di} + g t_{Di} + v_{D1} \end{pmatrix} \quad (57)$$

Die Startgeschwindigkeit setzt sich aus der Umfangsgeschwindigkeit der Schlagleisten beim Aufprall auf die Partikel und der Fallgeschwindigkeit der Partikel zusammen. Die Beschleunigungen, die auf die Partikel wirken, resultieren aus der Schwerkraft in vertikaler Richtung und der Strömungswiderstandskraft. Die Strömungswiderstandskraft ist dabei sowohl von der Relativgeschwindigkeit der Partikel zur Strömung w , vom Widerstandsbeiwert $c_f(\text{Re}_x)$, als auch von der Partikeloberfläche A_P abhängig. Die Strömungswiderstandskraft berechnet sich im Allgemeinen wie folgt:

$$F_f = c_f(\text{Re}_x) A_P \rho_f \frac{w^2}{2} \quad (58)$$

Der Widerstandsbeiwert $c_f(\text{Re}_x)$ hängt dabei von der Reynolds-Zahl Re ab und berechnet sich je nach dem Zustand der Umströmung, welcher laminar, visko-turbulent oder turbulent sein kann, unterschiedlich. Im Anhang: „Anhang 7: Partikelbewegung im Fluid“ sind einige wichtige Grundlagen der Partikelbewegung im Fluid detaillierter beschrieben.

Für die Beschleunigung a_f durch die Strömungswiderstandskraft folgt gemäß dem zweiten Newton'schen Gesetz:

$$a_f = \frac{F_f}{m_p} = \frac{c_f(\text{Re}_x) A_P \rho_f \frac{w^2}{2}}{m_p} = \frac{c_f(\text{Re}_x) \frac{1}{4} \pi d_p^2 \rho_f \frac{w^2}{2}}{\frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p} = c_f(\text{Re}_x) \frac{3 \rho_f w^2}{4 \rho_p d_p} \quad (59)$$

So folgt für die effektive Beschleunigung der Partikel:

$$\vec{a_W} = \begin{pmatrix} a_{Wx} \\ a_{Wy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_f(\text{Re}_{xx}) \frac{3 \rho_f w_x^2}{4 \rho_p d_p} \\ c_f(\text{Re}_{xy}) \frac{3 \rho_f w_y^2}{4 \rho_p d_p} - g \end{pmatrix} \quad (60)$$

Diese Gleichungen werden im folgenden Abschnitt auf die Laboranlage angewandt, und die partikelgrößenabhängigen Wurfbahnen werden simuliert.

Labortechnische Betrachtung der Fraktionierung des Grobguts

Anhand der im vorherigen Abschnitt dargelegten Gleichungen lassen sich die Wurfbahnen der Partikel in Abhängigkeit von der Korngröße berechnen. Die Wurfbahnen

hängen dabei von der Dimensionierung des Strömungskanals, den Strömungsparametern und den Startgeschwindigkeiten und -Positionen ab. Tabelle 11 fasst die zur Ermittlung der Wurfbahnen relevanten Parameter der Laboranlage zusammen:

Symbol	Bezeichnung	Wert	Einheit	Formel/Kommentar
Ausgangsparameter				
n	Drehzahl	13,4	1/s	variabel
ΔY_{DS}	Abstand der Drehachse zur Kanalöffnung	0,3	m	Entspricht ungefähr $1,33 L_D$
L_S	Länge des Strömungskanals	1,5	m	variabel
h_{DS}	Höhe der Öffnung zum Strömungskanal	0,22	m	Entspricht ungefähr L_D
h_S	Höhe des Strömungskanals	0,6	m	Entspricht ungefähr $2,67 L_D$
\dot{V}_{ef}	Effektive Strömung im Klassierraum	0,13	m ³ /s	Drehzahlabhängig
b	Breite der Anlage	0,4	m	Abhängig von der Bandanlage
Materialeigenschaften und Konstanten				
Re	Reynolds-Zahl	ca. 1,5 - 2000	-	Abhängig von w
$c_f(Re_x)$	Widerstandsbeiwert	ca. 18,72	-	Abhängig von Re
η	dynamischen Viskosität des Fluids	0,00001824	kg m ⁻¹ s ⁻¹	
ρ_f	Fluidichte	1	kg/m ³	
ρ_P	Partikeldichte	2970	kg/m ³	
d	Partikeldurchmesser	0,000063	m	Zwischen 63 μ m und 2 mm
g	Gravitationsbeschleunigung	9,81	m/s ²	

Tabelle 11: Dimensionierung des Strömungskanals zur Bestimmung der Partikelwurfbahnen

Diese Parameter sind für die Berechnung der Beschleunigungen und zur Bestimmung der vertikalen und horizontalen Grenzen der Wurfbahnen notwendig. Für die Bestimmung der Wurfbahnen werden sechs verschiedene Startpositionen der Partikel spezifisch betrachtet. Diese liegen in horizontaler Richtung in der Mitte und an den seitlichen Grenzen des Materialaufgabestroms bei $\pm h_A/2$. In vertikaler Richtung liegen diese Positionen am äußeren Rand des Wirkbereichs der Dispergiereinheit bei P_{Dy1} und bei der maximal möglichen Falltiefe der Partikel bei P_{Dy2} . Diese sechs Positionen stellen Grenzfälle dar. Die Wurfbahnen aller weiteren Partikel liegen zwischen diesen Grenzpositionen. Anhand dieser Positionen kann eine Simulation der Wurfbahnen vorgenommen werden. Die vorgestellten Gleichungen und Zusammenhänge sind allerdings dennoch positionsunabhängig und allgemeingültig. Diese Positionen und die damit verbundenen Startgeschwindigkeiten sind in Tabelle 12 dargestellt:

Symbol	Bezeichnung	Wert			Einheit	Formel/Kommentar
Parameter der Bewegungsgleichung						
P_{w0x}	Horizontale Position der Partikel	-0,02	0	0,02	m	$P_{Dx} = \Delta X_{Di}$
P_{w0y}	Vertikale Position beim Eintritt in den Wirkungsbereich (P_{D1})	0,224	0,225	0,224	m	$P_{D1y} = (L_D^2 - \Delta X_{D1}^2)^{0,5}$
	Vertikale Position bei maximaler Falltiefe (P_{D2})	0,165	0,166	0,165	m	$P_{D2y} = P_{D1y} - (N \cdot n \cdot v_{D1} + g) / (N^2 \cdot n^2)$
v_{w0x}	Horizontale Geschwindigkeit aufgrund des Impulses bei P_{D1}	18,87	18,94	18,87	m/s	$v_{Dix} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot L_{Di} \cdot \sin \alpha_{Di}$
	Horizontale Geschwindigkeit aufgrund des Impulses bei P_{D2}	13,87	13,97	13,87	m/s	
v_{w0y}	Vertikale Geschwindigkeit (Impuls- und Fallgeschwindigkeit) bei P_{D1}	0,459	-1,218	-1,225	m/s	$v_{Diy} = -2 \cdot \pi \cdot n \cdot L_{Di} \cdot \cos \alpha_{Di} - v_{Di}$
	Vertikale Geschwindigkeit (Impuls- und Fallgeschwindigkeit) bei P_{D2}	0,093	-1,584	-1,591	m/s	
a_{wx}	Horizontale Beschleunigung	wird im Folgenden erläutert			m/s ²	$a_{wx} = cf \cdot (Re_{xx}) \cdot 0,75 \cdot \rho_f \cdot w_x^2 / (\rho_p \cdot d_p) - g$
a_{wy}	Vertikale Beschleunigung				m/s ²	$a_{wy} = cf \cdot (Re_{yy}) \cdot 0,75 \cdot \rho_f \cdot w_y^2 / (\rho_p \cdot d_p) - g$

Tabelle 12: Parameter der Bewegungsgleichung zur Bestimmung der Partikelwurfbahnen

Die Beschleunigungen, die die Partikel erfahren, resultieren neben der Erdanziehung aus der Strömungswiderstandskraft. Diese ist von der jeweiligen Reynolds-Zahl bei der Umströmung der Partikel abhängig. Die Berechnung der Reynolds-Zahl ist im Anhang 7: Partikelbewegung im Fluid“ beschrieben. Für die vertikale Partikelbewegung, bei der kleinere Sinkgeschwindigkeiten, d.h. Relativgeschwindigkeiten zwischen Partikel und Fluid, auftreten, liegen die Reynolds-Zahlen hauptsächlich im visko-turbulenten Bereich und für feine Körnungen teilweise auch im laminaren Bereich. Für die horizontale Partikelbewegung ergeben sich aufgrund der höheren Sinkgeschwindigkeit Reynolds-Zahlen, die sich in den Bereich der visko-turbulenten und turbulenten Umströmung einordnen. Der Widerstandsbeiwert ist nach Kaskas berechnet worden [46]. Die Beschleunigungen bzw. die Abbremsungen, die die Partikel aufgrund der Luftwiderstandskraft erfahren, sind in Abbildung 32 in Abhängigkeit zur Partikelgröße dargestellt. Dabei ist der Betrag der Beschleunigung angegeben.

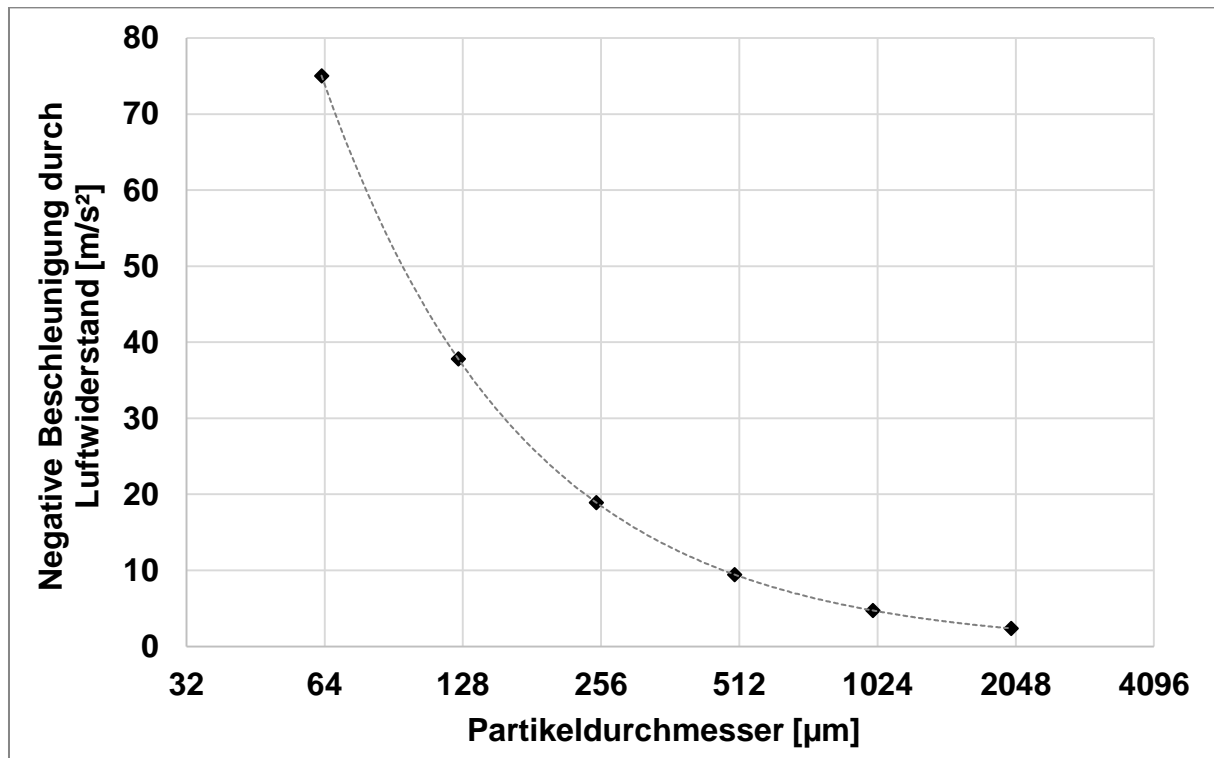


Abbildung 32: Abbremsung der Partikel durch die Luftwiderstandskraft in Relation zur Partikelgröße bei einer Relativgeschwindigkeit von 1 m/s

Abbildung 32 zeigt, dass die aus der Widerstandskraft resultierende Beschleunigung exponentiell mit der Partikelgröße abnimmt. Mit einer Verdopplung der Partikelgröße geht dabei eine Halbierung der Beschleunigung einher. Die Beschleunigung ist ebenfalls von der Sinkgeschwindigkeit der Partikel anhängig. Der Betrag der Beschleunigung steigt quadratisch mit dieser an. Hierbei ist anzumerken, dass der Einfluss des Feinguts, welches sich in der Strömung angereichert hat, nicht berücksichtigt worden ist. Hierdurch sind allerdings ein höherer Strömungswiderstand und eine geringere Geschwindigkeit zu erwarten. Da sich dieser Einfluss nicht genau beziffern lässt, wird er für die weiteren Berechnungen außenvorgelassen. Der Strömungswiderstand nimmt bei geringeren Relativgeschwindigkeiten w quadratisch ab und bei höheren Relativgeschwindigkeiten quadratisch zu.

Die Partikel werden nur solange vertikal beschleunigt, bis die Strömungswiderstandskraft der entgegen gerichteten Gravitationskraft entspricht. In diesem Fall haben die Partikel ihre konstante Sinkgeschwindigkeit erreicht. Bei einer Korngröße von $63\text{ }\mu\text{m}$ ist dies nach ca. $0,15\text{ s}$ der Fall. Bei einer Korngröße von $250\text{ }\mu\text{m}$ sind es $1,4\text{ s}$ und bei 1 mm sind es ca. 5 s . Der Verlauf der vertikalen Geschwindigkeit und der entsprechenden vertikalen Position der Partikel ist in Abbildung 33 für Partikel mit einer Korngröße von $63\text{ }\mu\text{m}$ dargestellt:

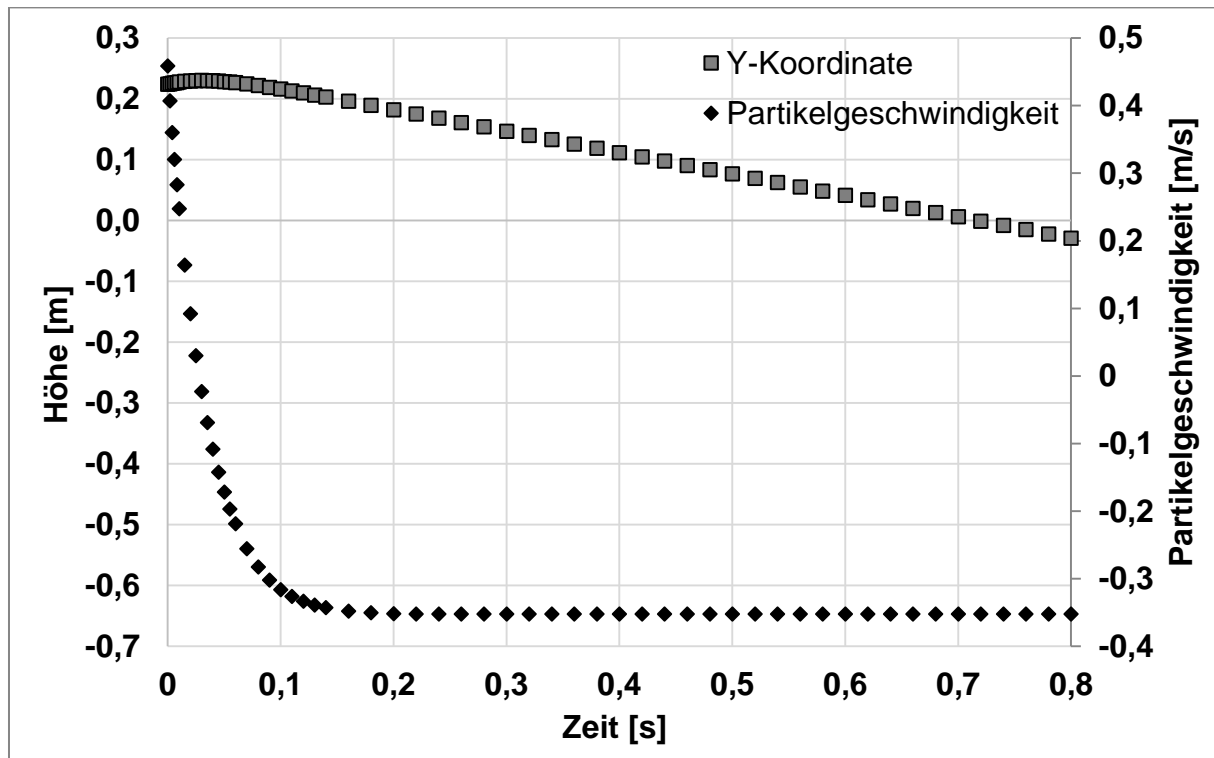


Abbildung 33: Geschwindigkeits- und Höhenprofil von Partikeln mit einer Größe von 63 μm

Die konstante Sinkgeschwindigkeit der Partikel mit einer Größe von 63 μm beträgt ca. 0,35 m/s und wird nach 0,15 s erreicht. Das Geschwindigkeitsprofil gleicht ab diesem Zeitpunkt einer Horizontalen, wohingegen das Höhenprofil einer Geraden mit einer konstanten Steigung gleicht. Basierend auf der Bestimmung der Geschwindigkeitsprofile und unter Berücksichtigung der entsprechenden Startpositionen und -Geschwindigkeiten lassen sich die Partikelwurfbahnen berechnen und simulieren. Die Partikelwurfbahnen in Abhängigkeit zur Korngröße für die Position (-0,02 / 0,224) sind in Abbildung 34 dargestellt:

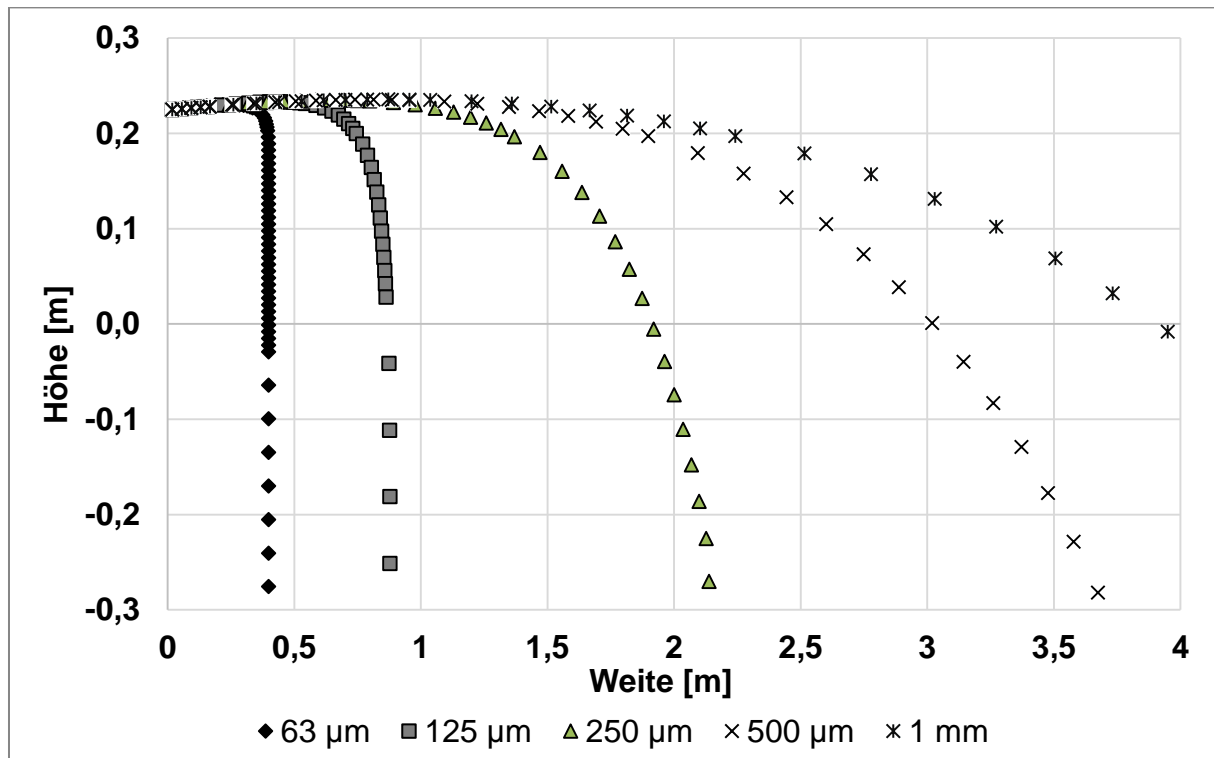


Abbildung 34: Partikelwurfbahnen in Abhängigkeit zur Korngröße ausgehend von der Position (-0,02 / 0,224)

Der Strömungskanal weist dabei eine Länge von 1,2 m und eine Höhe von 0,6 m auf. Diese Höhe verteilt sich zu je 30 cm über und unter der Drehachse, dem Zentrum des Koordinaten-Systems. Der Kanalboden liegt folglich bei einer Höhe von -0,3 m. Aufgrund dessen ist das Koordinatensystem in Abbildung 34 bei -0,3 m begrenzt. Aus der Abbildung geht eine deutliche Fraktionierung hervor. Zwischen den Grenzen der verschiedenen Kornklassen befinden sich jeweils mehr als 0,5 m. Die Wurfweiten der jeweiligen Korngrößen sind für die sechs verschiedenen Grenzpunkte in Abbildung 35 dargestellt:

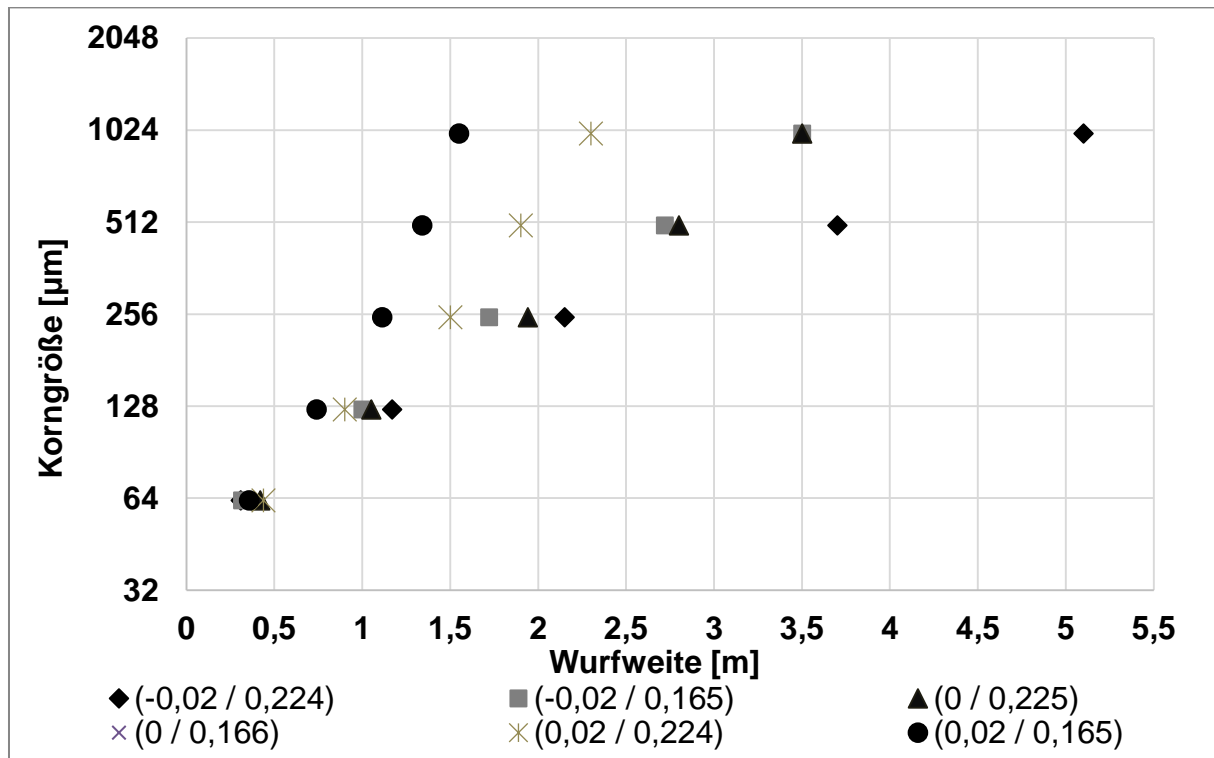


Abbildung 35: Wurfweiten der Partikel an den sechs kritischen Punkten in Abhängigkeit der Korngröße

Dabei ist festzustellen, dass die Wurfweiten ausgehend von den jeweiligen Startpositionen für feine Partikel nah beieinanderliegen, wohingegen sich die Wurfweiten bei groben Partikel stärker unterscheiden. Die Wurfweiten für Partikel mit einer Korngröße von 63 µm liegen zwischen 0,3 m und 0,44 m. Die Wurfweiten für Partikel mit einer Korngröße von 1 mm liegen zwischen 1,55 m und 5,1 m. Da die Partikel an unterschiedlichen Positionen von der Dispergiereinheit erfasst werden, tritt eine Überlagerung der Kornklassen im Klassierraum auf.

Zusammenfassung der Fraktionierung des Grobguts im Strömungskanal

Die Fraktionierung des Grobguts im Strömungskanal tritt durch korngößenabhängige Strömungswiderstandskräfte auf. Diese Kräfte verdoppeln sich mit jeder Halbierung der Partikelgröße. Die Wurfbahnen der Partikel lassen sich auf Basis der wirkenden Kräfte berechnen. Damit lassen sich die Korngrößen der jeweiligen Partikel ihren Wurfweiten zuordnen. Dadurch, dass die Partikel an verschiedenen Punkten von den Schlagleisten erfasst werden und so ihre Wurfbahnen mit unterschiedlichen Startpositionen und -Geschwindigkeiten antreten, kommt es im Strömungskanal zur Überlappung verschiedener Trennzonen. Gemäß den Berechnungen wird das Feinkorn, der Gesteinsfüller, zuerst abgelagert. Dies lässt sich auch bei den Labortests durch eine Anreicherung dieser Korngröße im vorderen Teil des Strömungskanals beobachten.

Der Großteil des Gesteinsfüllers wird allerdings mit der Fluidströmung ausgetragen, was die Laboruntersuchungen ebenfalls nachweisen. Insofern lässt sich einerseits die Annahme bestätigen, dass sich das Feingut durch die Dispergierung im Fluid anreichert und mit diesem ausgetragen wird. Andererseits stellt dieses Phänomen einen potenziellen Nachteil des Verfahrens dar, da es zu einer Anreicherung des Trennkorns im vorderen Teil des Strömungskanals kommen kann. Um dieses Problem zu lösen, könnte ein weiterer Feingutaustrag zum Einsatz kommen.

5.4 Funktionsweise der Absauge-Einheit

Die Absauge-Einheit befindet sich am Ende des Strömungskanals über der Kanalkrümmung. Sie besteht aus einem externen Radiallüfter, der eine Strömung erzeugt und über einen Schlauch an den Strömungskanal angeschlossen ist. Für die Dimensionierung des Klassierers ist eine Betrachtung der notwendigen Strömung und des Energieverbrauchs der Absaugung von Bedeutung. Ebenfalls wird in diesem Kapitel auf eine Trennzone zum Abtrennen von Fehlkorn und auf Optimierungspotenziale für den industriellen Einsatz eingegangen. Die Absauge-Einheit ist in Abbildung 36 fotografisch dargestellt:

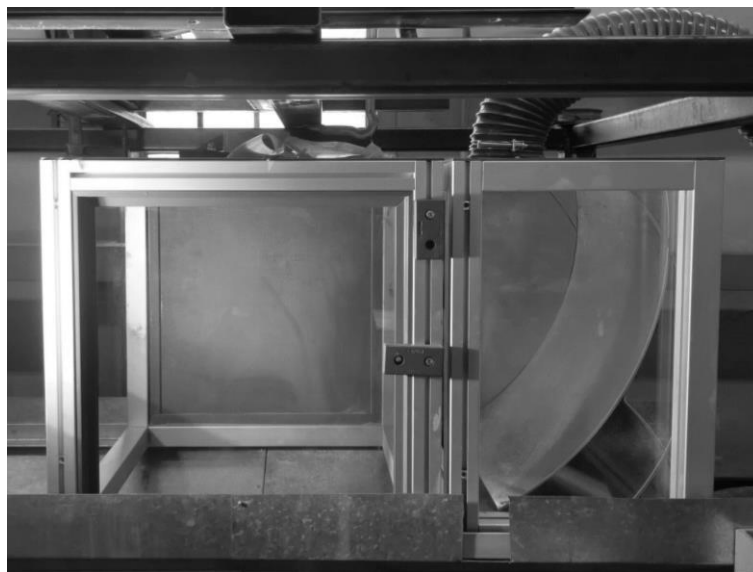


Abbildung 36: Fotografische Darstellung der Absauge-Leitung am Ende des Strömungskanals

An den Radiallüfter ist ein Feingutabscheider angeschlossen, welcher eine Korngrößenanalyse des Feinguts und damit eine Bestimmung des Fehlkornanteils ermöglicht. Der durch den Radiallüfter erzeugte Luftstrom ist regelbar. Die Drehzahl und damit indirekt der Energieverbrauch und die Volumenströmung lassen sich in Einstellungsstufen von „0 – 1000“ regeln. Die erzeugte Luftströmung, bzw. die mittlere Strömungsgeschwindigkeit, ist in der Öffnung zum Strömungskanal gemessen worden. Dabei ergibt sich, wie für die Dispergiereinheit, ein linearer Zusammenhang zwischen der erzeugten Strömung \dot{V}_A und der Einstellungsstufe E_A :

$$\dot{V}_A \approx \frac{0,6 E_A - 16}{10000} \quad (61)$$

Dieser Zusammenhang weist einen Korrelationsindex von 0,998 auf. Die Korrelation der Messdaten ist in Abbildung 37 dargestellt:

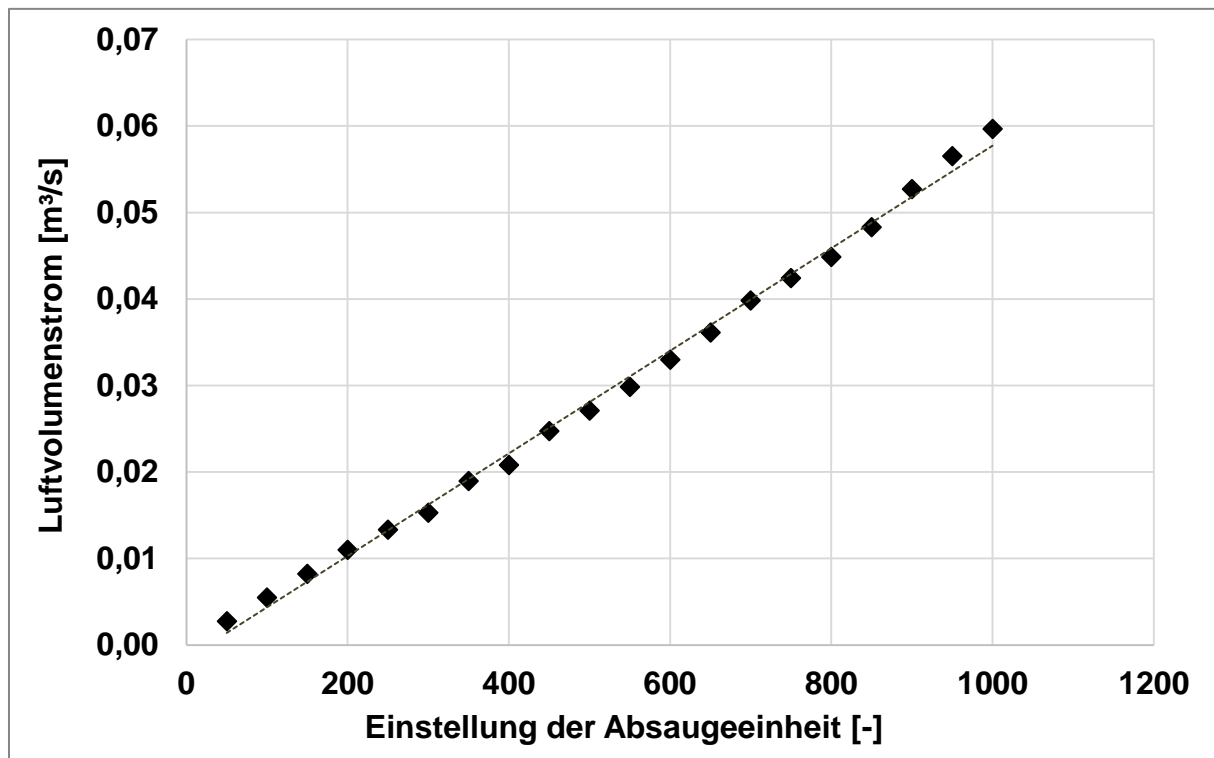


Abbildung 37: Korrelation zwischen dem an der Öffnung zum Strömungskanal erzeugten Volumenstrom und der Einstellungsstufe der Absauge-Einheit

Dieser lineare Zusammenhang der für die im Labor verwendete Konstellation der Absauge-Einheit festgestellt wird, muss nicht für andere Absauge-Konfigurationen gelten. Die Laborkonfiguration besteht neben dem Lüfter aus je zwei 2 m-langen Schläuchen mit einem Durchmesser von 12,5 cm, welche den Lüfter mit dem Strömungskanal und mit dem Feingutabscheider verbinden. Der Durchmesser der Öffnung zum Strömungskanal d_A beträgt 10 cm. Die Querschnittsfläche A_A beträgt folglich 0,00785 m². Als Feingutabscheider ist eine Expansionskammer verwendet worden, welche einen vergleichsweise geringen Strömungswiderstand darstellt. Der vom Lüfter erzeugte Volumenstrom ist von der Summe der auftretenden Strömungswiderstände ζ abhängig, welche sich aus Form- und Reibungswiderständen zusammensetzen. Dabei gilt der folgende Zusammenhang:

$$\eta P_{Ab} = \Delta p_A \dot{V}_A = \dot{V}_A \frac{\zeta}{\eta} \rho_f v_A^2 \rightarrow \zeta \sim \frac{1}{\dot{V}_A^3} \sim \frac{1}{v_A^3} \quad (62)$$

Die Volumenströmung \dot{V}_A bzw. die Luftgeschwindigkeit v_A nimmt bei einer Erhöhung der Strömungswiderstandsbeiwerts ζ infolge einer Erhöhung des Druckverlusts Δp_A ohne eine Veränderung der Leistung P_{Ab} hyperbolisch ab. Dies macht sich z. B. bei der Installation eines Filters als Feingutabscheider bemerkbar. Durch diesen nimmt die Volumenströmung im Vergleich zur Expansionskammer um mehr als 50 % ab. Bei einer Lüftereinstellung von „500“ reduziert sich der Volumenstrom beim Einsatz des Filters von 0,0246 m³/s auf 0,0115 m³ pro Sekunde. Bei einer Drehzahleinstellung von „1000“ reduziert sich der Volumenstrom von 0,06 m³/s auf 0,0265 m³/s. Dieser Effekt macht sich auch bei der Wahl der Verbindungsschläuche bemerkbar. So resultiert z. B. der Einsatz längerer Schläuche mit einer Länge von 4 m mit einem geringeren Durchmesser von 10 cm in einer Abnahme der Volumenströmung von ca. 45 %.

Der Energieverbrauch des Radiallüfters P_{Ab} steigt hyperbolisch mit der Einstellungsstufe E_A , und damit dem Volumenstrom \dot{V}_A , an. Dieser Anstieg kann mit folgender empirischer Gleichung beschrieben werden:

$$P_{Ab} \approx \frac{0,001 E_A^3 - 0,7 E_A^2 + 263,7 E_A}{1000} + 48,82 \quad (63)$$

Für den Volumenstrom \dot{V}_A in der Öffnung zum Strömungskanal lässt sich der folgende Zusammenhang ableiten:

$$P_{Ab} \approx \frac{3000 \dot{V}_A^3 - 35,784 \dot{V}_A^2 + 1,5235 \dot{V}_A}{0,001} + 61,58 \quad (64)$$

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 38 durch eine Korrelation der Messdaten dargestellt:

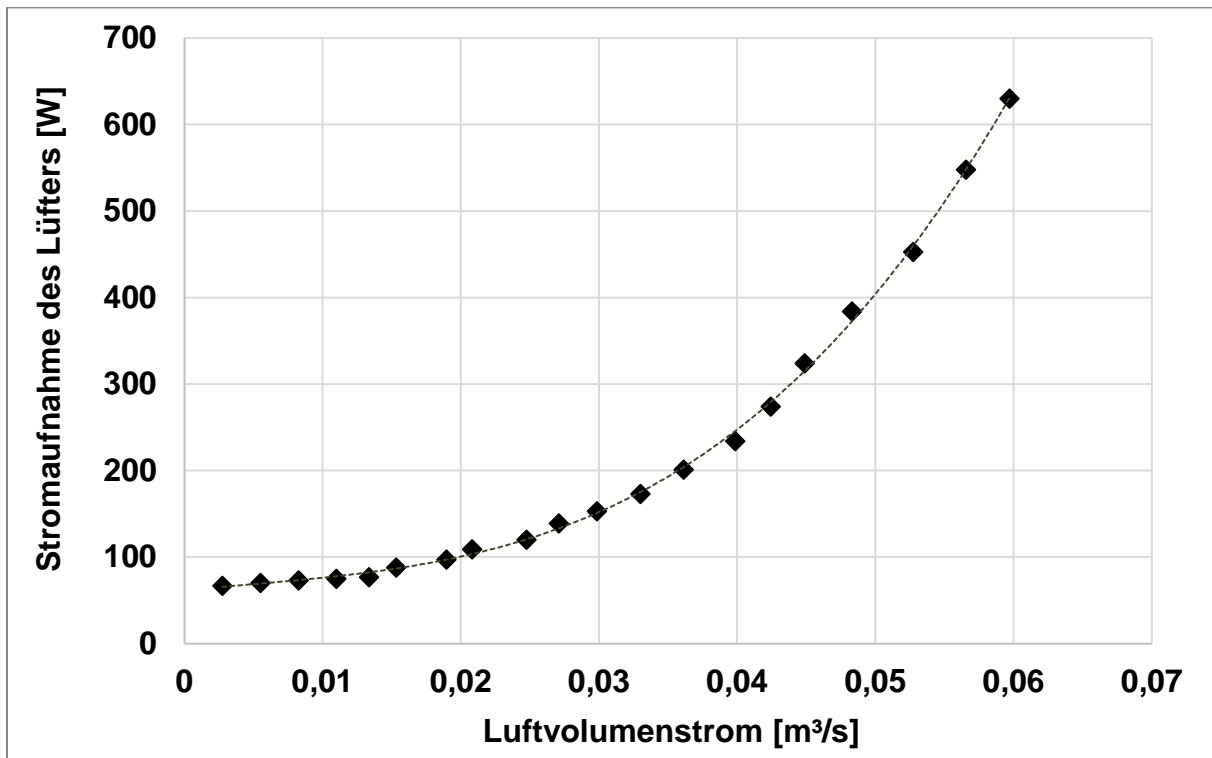


Abbildung 38: Korrelation zwischen dem erzeugten Volumenstrom und der Stromaufnahme des Lüfters

Die Korrelation weist einen Korrelationsindex von 0,9995 auf. Die Startleistung des Lüfters liegt bei ca. 60 W. Allerdings muss angemerkt werden, dass dieser Zusammenhang nur für die bei den Untersuchungen verwendete Konstellation aus Verbindungsschläuchen, Lüfter und Feingutabscheider gilt.

In Kapitel 5.3 ist die Annahme dargelegt worden, dass die Absauge-Strömung \dot{V}_A der durch die Dispergiereinheit erzeugten Strömung \dot{V}_{DS} entsprechen muss. Dies liegt daran, dass der Luftwiderstand, der durch die Anordnung und Gestaltung der Absauge-Einheit auftritt, so hoch ist, dass die Luftströmung nicht von selbst durch den Absauge-Kanal herausströmen kann. Um zu überprüfen, inwiefern die im bzw. vor dem Strömungskanal erzeugte Strömung den Volumenstrom \dot{V}_A im Absaugekanal beeinflusst, sind Messungen der Strömungsgeschwindigkeit an der Kanalöffnung bei verschiedenen Strömungseinstellungen der Dispergiereinheit und des Absauge-Lüfters vorgenommen worden. Der Einfluss dieser Strömungen ist in Abbildung 39 exemplarisch für die Lüftereinstellung „1000“ dargestellt worden:

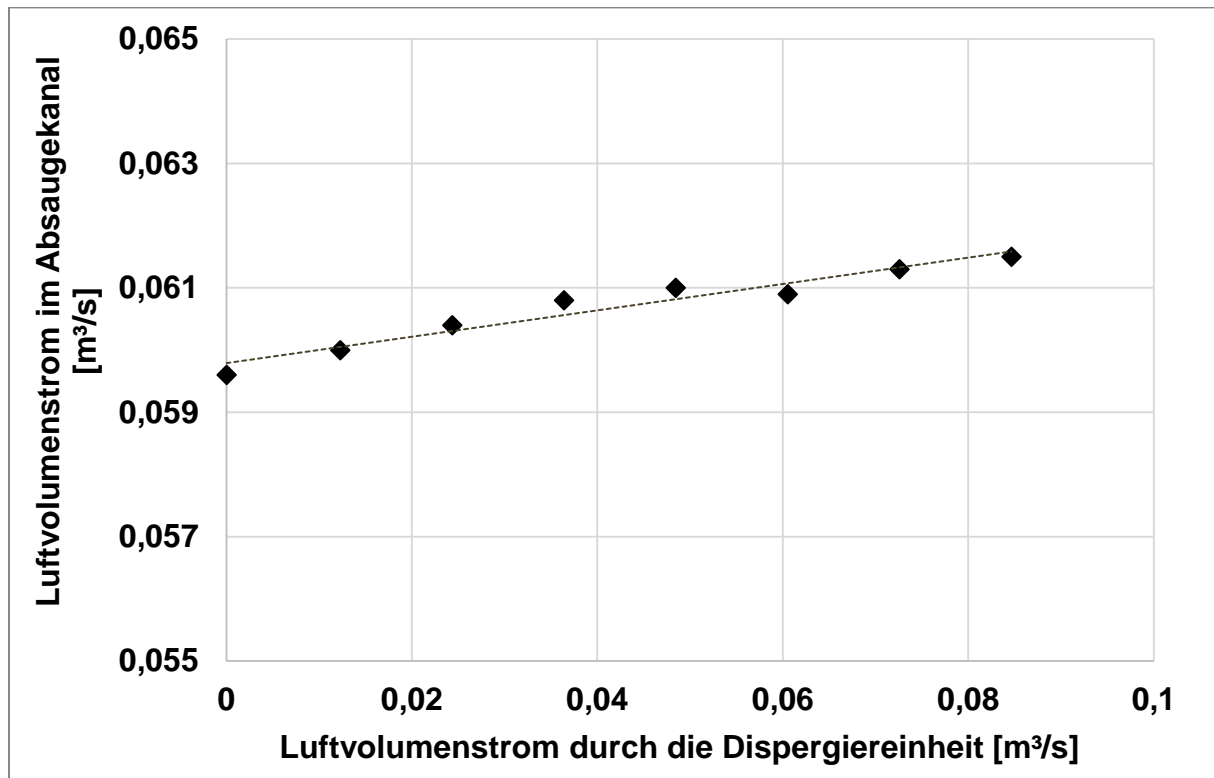


Abbildung 39: Einfluss der Drehzahl der Dispergiereinheit und der damit verbundenen Strömung auf den Volumenstrom im Absauge-Kanal.

Der Einfluss der Strömung, die durch die Dispergiereinheit erzeugt wird, auf die Strömung im Absauge-Kanal ist sehr gering. Bei einer Zunahme der Volumenströmung durch die Dispergiereinheit von 0 m³/s auf 0,056 m³/s nimmt die Strömung im Absauge-Kanal gerade einmal um 6,7 % auf 0,063 m³/s zu. Dabei wird die Strömung der Dispergiereinheit am Ende des Strömungskanals und der damit verbundene Strömungswiderstand berücksichtigt. Wird bei einer hohen Drehzahl der Dispergiereinheit eine zu starke Strömung erzeugt oder eine zu niedrige Absauge-Strömung eingestellt, kommt es zu einem Überdruck im Klassierraum. Infolge dessen sucht sich die mit dem Feingut beladene Luft weitere Wege, um aus dem Klassierer auszutreten. So tritt das Luft-Partikel-Gemisch an den Seiten zwischen den Segmenten des Kanals und insbesondere unter der Dispergiereinheit aus, was zu einer Staubbelastung im Labor führt. Dieser Staubaustritt ist exemplarisch in Abbildung 40 dargestellt:



Abbildung 40: Staubaustritt unter der Materialaufgabe bei unzureichender Absauge-Strömung

Die Annahme, dass durch die Anordnung der Absauge-Einheit ein derart hoher Strömungswiderstand besteht, dass der Absauge-Strom nahezu komplett durch die Absauge-Einheit erzeugt werden muss, ist damit bestätigt. Eine ausreichende Absauge-Strömung ist folglich für die Funktionalität des Klassierers unabdingbar.

Der Lüfter der Absauge-Einheit hat folglich nur die Aufgabe, den durch die Strömungswiderstände auftretenden Druckverlust auszugleichen. Folglich lässt sich der benötigte Volumenstrom der Absauge-Einheit in Abhängigkeit von der Drehzahl der Dispergiereinheit wie folgt bestimmen:

$$\dot{V}_A \approx \dot{V}_{ef} \approx 0,00968 n \quad (65)$$

Diese Anordnung der Absauge-Einheit kann trotz des hohen Strömungswiderstands unter dem Gesichtspunkt der Fehlkornabtrennung als notwendig und sinnvoll angesehen werden. Dadurch, dass die Absauge-Einheit im Gegensatz zur Dispergiereinheit, eine nach oben gerichtete Strömung erzeugt, kann eine Trennzone gebildet werden. In dieser Trennzone entspricht die Strömungsgeschwindigkeit der Abluft v_T der kritischen Sinkgeschwindigkeit des Trennkorns w_{krit} . Dabei gilt der folgende Zusammenhang:

$$v_T = w_{krit} \quad (66)$$

Die kritische Sinkgeschwindigkeit für Körnungen mit einer Korngröße von 63 µm beträgt dabei ca. 0,222 m/s. Die Geschwindigkeit der Strömung in der Trennzone v_T stellt sich bei der Aufweitung des Luftstroms nach dem Verlassen des Absauge-Kanals ein. Durch diese Aufweitung verlangsamt sich die Strömungsgeschwindigkeit v_A gemäß dem Kontinuitätsprinzip. Es gilt:

$$v_T A_T = v_A A_A \quad (67)$$

Bei einer Lüftereinstellung von "1000" ist eine Aufweitung der Strömung auf eine Trennzonenfläche A_T von 0,266 m² bei der Laboranlage notwendig. Unter der Annahme, dass sich der Volumenstrom mit einem Winkel von α_T an beiden Seiten ausweitet, lässt sich der vertikale Abstand der Trennzone zum Absauge-Kanal h_T wie folgt bestimmen:

$$d_T = 2 h_T \cos \alpha_T + d_A \rightarrow h_T = \frac{d_T - d_A}{2 \cos \alpha_T} \quad (68)$$

Wobei d_T der Durchmesser der Trennzonenfläche und d_A der Durchmesser des Absauge-Kanals ist. Bei der Laboranlage liegt die Trennzone bei einer Lüftereinstellung von "1000" und einer Ausweitung der Luftströmung mit einem Winkel α_T von 45 ° ca. 18,25 cm unter der Kanalöffnung. Eine Zusammenfassung der Parameter der Absauge-Einheit ist in Tabelle 13 gegeben:

Ausgangsparameter				
d_A	Durchmesser der Absaugeleitung	0,1	m	
A_A	Querschnitt der Absaugeleitung	0,0079	m²	
E_A	Einstellung des Absaugelüfters	1000	m	variabel von 0 bis 1000
\dot{V}_{ef}	Luftvolumenstrom im Kanal	0,13	m³/s	Abhängig von der Drehzahl n
α_T	Ausweitungswinkel des Luftstroms	45	°	
Materialeigenschaften und Konstanten				
w_{krit}	Krit.Sinkgeschwindigkeit des Trennkorns	0,222	m/s	für eine Korngröße von 63 µm
Zielparаметer				
\dot{V}_A	Absaugeströmung in Abhängigkeit von E_A	0,0584	m³/s	$\dot{V}_A \approx (0,6 E_A - 16) / 10000$
	Benötigte Absaugeströmung	0,13	m³/s	$\dot{V}_A \approx \dot{V}_{ef} \approx 0,00968 n$
P_{ab}	Stromaufnahme des Absaugelüfters	626,04	W	$P_A = 1000 \cdot (3000 \dot{V}_A^3 - 36 \dot{V}_A^2 + 1,5 \dot{V}_A) + 62$
A_T	Fläche der Trennzone	0,263	m²	$v_T A_T = v_A A_A$
h_T	Vertikaler Abstand der Trennzone	0,180	m	$h_T = (A_T - A_A) / (2 \cos \alpha_T)$

Tabelle 13: Zusammenfassung der Parameter der Absauge-Einheit

Die Funktionsweise der Absauge-Einheit lässt sich wie folgt zusammenfassen: Die Absauge-Einheit hat die Aufgabe den in den Strömungskanal strömenden Luftstrom,

in welchem sich das Feingut infolge der Dispergierung angereichert hat, aus dem Strömungskanal zu ziehen und zum Feingutaustrag zu transportieren. Da die Absaugeinheit in ihrer Anordnung einen hohen Strömungswiderstand darstellt, dient der Lüfter der Absaugeinheit maßgeblich dazu, den Druckverlust, der aus den Strömungswiderständen resultiert, auszugleichen. Die Absauge-Strömung \dot{V}_A muss dabei ungefähr der Strömung \dot{V}_{DS} , die durch die Dispergiereinheit erzeugt wird, entsprechen. Durch die Anordnung der Absaugeinheit lässt sich eine Trennzone im Strömungskanal erzeugen. In dieser Trennzone fallen alle Körnungen, die die Trennkorngröße überschreiten, aus dem Fluid heraus. So kann der Austrag von Fehlkorn verhindert werden. In dieser Trennzone muss die Strömungsgeschwindigkeit ca. 0,222 m/s betragen.

Die Absaugeinheit der Laboranlage besteht aus einem Radiallüfter, welcher mit Schläuchen mit dem Strömungskanal und dem Feingutabscheider verbunden ist. Mit dem Lüfter lassen sich Volumenströme an der Öffnung zum Strömungskanal von bis zu 0,06 m³/s erzeugen. Diese Strömung ist im Vergleich zu der von der Dispergiereinheit erzeugten Strömung gering. Der Lüfter der Absaugeinheit benötigt zur Strömungserzeugung allerdings ca. 2,5-mal so viel Energie wie die Dispergiereinheit, was eine Auswirkung des hohen Strömungswiderstands ist. Ein weiterer Nachteil der Laboranlage ist der geringe Durchmesser des Absauge-Kanals, welcher den Strömungswiderstand erhöht. Dieser Durchmesser sollte näher an dem Durchmesser der Trennfläche, bei welcher die kritische Sinkgeschwindigkeit der Partikel der Strömungsgeschwindigkeit entspricht, liegen. Für einen industriellen Einsatz sind ein stärkerer Absauge-Lüfter, die Reduktion von Strömungswiderständen und eine Vergrößerung des Kanaldurchmessers zu empfehlen. Für die Untersuchungen der Trennschärfe und der zulässigen Gutbeladung sowie zur Überprüfung der im Labor aufgestellten Annahmen scheint die Absauge-Einheit der Laboranlage allerdings ausreichend dimensioniert.

5.5 Zusammenhang zwischen den Hauptkomponenten der Neuentwicklung

Dieses Kapitel hat den Zweck die Funktionsweise des Schlagleisten-Querstromsichters zu erläutern und die Abhängigkeit der verschiedenen Parameter und Dimensionierungen untereinander aufzuzeigen. Die wesentlichen Parameter sind dabei der Durchsatz \dot{M} und die Drehzahl der Dispergiereinheit n sowie die für die gewünschte Trennschärfe zulässige Gutbeladung $\%G$. Diese ist anhand von Laboruntersuchungen ermittelt worden, welche im nächsten Kapitel vorgestellt werden. Die wichtigste Dimensionierung des Klassierers ist die der Länge L_D und Anzahl N der Schlagleisten. Alle weiteren Parameter und Dimensionen stehen in Abhängigkeit zu diesen Parametern.

Diese Abhängigkeiten und Zusammenhänge werden im Folgenden anhand der Funktionsweisen der vier Gerätekomponenten, der Aufgabeeinheit, der Dispergiereinheit, des Strömungskanals und der Absaugungseinheit, zusammengefasst. Diese Komponenten sowie die Parameter und Dimensionierungen sind in Abbildung 41 schematisch dargestellt:

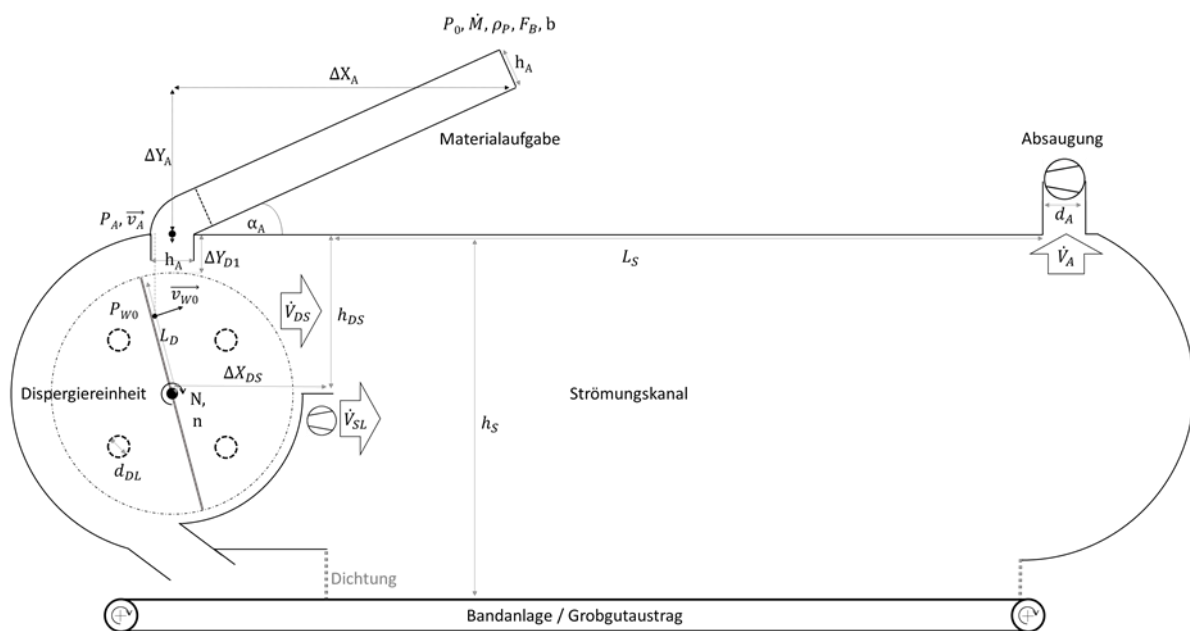


Abbildung 41: Schematische Darstellung der Laboranlage mit allen Parametern

Die Aufgabeeinheit hat die Funktion, das Aufgabegut, welches über eine Bandanlage transportiert wird, kontinuierlich, gleichmäßig und räumlich gezielt in den Dispergierraum aufzugeben. Die Breite b des Klassierers und all seiner Komponenten ist dabei an der Breite der Bandanlage auszurichten. Die Aufgabeeinheit an sich besteht aus einer Rutsche und einem Fallschacht. Über die Länge L_A und Neigung α_A lassen sich

in Abhängigkeit der Startposition P_0 und Geschwindigkeit v_0 der Partikel deren Position P_A und Geschwindigkeit v_A beim Eintritt in den Dispergierraum festlegen. Die Position P_A sollte dabei direkt über der Drehachse der Dispergiereinheit liegen. In Relation zum Durchsatz kann die Höhe des Förderstroms h_A bestimmt werden. Die Zusammenhänge sind dabei die folgenden:

Symbol	Bezeichnung	Auslegung des Parameters
\dot{M}	Durchsatz bzw. Massenstrom	Variabler Hauptparameter
b	Breite des Klassierers	Entspricht der Breite der Bandanlage.
P_A	Position des Förderstroms beim Eintritt in den Dispergierraum	Festgelegt bei $(0 / \Delta Y_{DS})$. Dient zur Bestimmung von L_A und α_A in Abhängigkeit von P_0 und v_0 .
h_A	Höhe bzw. Breite des Förderstroms	$h_A = \dot{M} F_B / (v_0 b \rho_p)$
v_A	Geschwindigkeit des Förderstroms	Entspricht ungefähr v_0 insofern die Reibungskraft auf der Rutsche ca. der Hangabtriebskraft entspricht.

Tabelle 14: Zusammenfassung der wesentlichen Parameter der Materialaufgabe

Im Dispergierraum fällt das Aufgabegut herab, bis es in den Wirkungsbereich der Dispergiereinheit eintritt. Dieser liegt auf Höhe der Drehachse in einer Entfernung von ΔY_{DS} von der Materialaufgabe. Die Entfernung entspricht ca. einem Drittel der Länge der Schlagleisten L_D . Im Dispergierraum wird das Partikelkollektiv von den Schlagleisten erfasst und dispergiert. Im Zuge der Dispergierung reichert sich das Feingut in der Luftströmung an, während das Grobgut durch den Impuls in den Strömungskanal geworfen wird. In Abhängigkeit der Anzahl N , Länge L_D und Drehzahl n der Schlagleisten lässt sich die maximale Falltiefe $P_{D1y} - P_{D2y}$ im Dispergierraum bestimmen. Um die Partikel effektiv zu erfassen, ist eine Mindest-Drehzahl n_{krit} der Dispergiereinheit erforderlich. Im Gegensatz zum Grobgut reichert sich das Feingut infolge der Dispergierung in der Luftströmung an und wird mit dieser transportiert. Die Dispergiereinheit ist einer der zwei wesentlichen Strömungserzeuger des Klassierers. Die erzeugte Strömung \dot{V}_{DS} lässt sich auf Basis der Drehzahl n , Anzahl N und Länge der Schlagleisten L_D berechnen. Der Energieverbrauch der Dispergiereinheit lässt sich anhand der Parameter sowohl für die Strömungserzeugung P_{DS} als auch für das Werfen der Partikel P_{DW} genau berechnen.

Die Zusammenhänge sind in Tabelle 15 dargestellt:

Symbol	Bezeichnung	Auslegung des Parameters
ΔY_{AD}	Abstand zwischen der Materialaufgabe & dem Wirkungsbereich der Dispergiereinheit	$\Delta Y_{AD} \approx L_D / 3$
L_D	Länge der Schlagleisten	Nicht variabler Hauptparameter, der bei den Untersuchungen 0,225 m entspricht.
N	Anzahl der Schlagleisten	Nicht variabler Hauptparameter, der bei den Untersuchungen 2 entspricht.
n	Drehzahl der Dispergiereinheit	Variabler Hauptparameter
P_{D1y}	Vertikale Koordinate der Partikel beim Eintritt in den Wirkungsbereich	$P_{D1y} = (L_D^2 - \Delta X_D^2)^{0,5}$, wobei ΔX_D die horizontale Koordinate der Partikel ist
v_{D1}	Fallgeschwindigkeit bei P_{D1y}	$v_{D1} = (v_{Ay}^2 - 2 g \Delta Y_{DS}^2)^{0,5}$
P_{D2y}	Vertikale Koordinate der Partikel bei maximaler Falltiefe	$P_{D2y} = P_{D1y} - (N n v_{D1} + g) / (N^2 n^2)$
v_w	Partikelgeschwindigkeit infolge des Aufpralls der Schlagleisten (Impuls)	$v_{Wix} = 2 \pi n L_{Di} \sin \alpha_{Di}$ & $v_{Wiy} = -2 \pi n L_{Di} \cos \alpha_{Di} - v_{Di}$, wobei v_{Di} die Fallgeschwindigkeit am Aufprallpunkt und α_{Di} der Drehwinkel der Schlagleisten ist.
n_{krit}	Minimal notwendige Drehzahl, damit die Partikel von den oberen 50 % der Schlagleisten erfasst werden	$n_{krit} = (v_{D1} + (v_{D1}^2 + 2g L_D)^{0,5}) / (L_D N)$
\dot{V}_{DS}	Von der Dispergiereinheit erzeugter Luftvolumenstrom	$\dot{V}_{DS} = b \pi N n L_D^2 F_{DS}$, wobei F_{DS} ein Korrekturfaktor ist
P_{DS}	Stromaufnahme zur Strömungserzeugung	$P_{DS} = 0,5 \rho_{fl} b h_{DS} v_{DS}^3 \zeta / \eta$
P_{DW}	Stromaufnahme zum Wurf der Partikel	$P_{DW} = 0,5 \dot{M} v_{DP}^2 / \eta$
$\Delta \dot{V}_{DS}$	Abnahme des Luftvolumenstroms in Relation zur Länge des Strömungskanals	$\Delta \dot{V}_{DS} = (8,73 L_S^3 + 20,26 L_S^2 + 0,18 L_S + 0,21) \%$

Tabelle 15: Zusammenfassung der wesentlichen Parameter der Dispergiereinheit

Im Strömungskanal kommt es zu einer Fraktionierung des Grobguts entlang der Länge des Kanals L_S . Dabei werden die geworfenen Partikel von korngößenabhängigen Widerstandskräften abgebremst. Diese Widerstandskräfte verdoppeln sich bei jeder Halbierung der Korngröße. Die jeweiligen Wurfbahnen der Partikel lassen sich anhand ihrer Position P_{w0} und Geschwindigkeit v_{w0} nach der Kollision mit den Schlagleisten berechnen und simulieren. Da die Partikel an unterschiedlichen Positionen von den Schlagleisten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfasst werden, weisen diese auch unterschiedliche Wurfbahnen auf. Diese Unterschiede nehmen mit der Breite des Aufgabestroms h_A und der Geschwindigkeit der Partikel bei der Aufgabe v_A zu und reduzieren sich bei einer größeren Länge der Schlagleisten L_D oder einer höheren Drehzahl n . Generell gilt dabei, dass feine Partikel ähnliche Wurfweiten aufweisen, wohingegen grobe Körnungen über einen größeren Bereich geworfen werden. Eine eindeutige Trennung gröberer Fraktionen ist allein über den Wurfmechanismus nicht ohne weiteres zu realisieren.

Das Feingut hingegen wird im Strömungskanal mit der Fluidströmung zum Feingutaustrag befördert. Diese Strömung gelangt durch eine Öffnung von der Dispergiereinheit in den Strömungskanal, welche über eine Höhe h_{DS} verfügt und ungefähr der Länge der Schlagleisten L_D entspricht. Der Strömungskanal hingegen verfügt über eine Höhe h_S , welche konstruktionsbedingt ungefähr dem doppelten Abstand zwischen der Drehachse der Dispergiereinheit zur Materialaufgabe entspricht. Dies liegt daran, dass sich die Drehachse der Dispergiereinheit auf mittlerer Kanalhöhe befinden muss, damit eine Bandanlage, welche den Grobgutaustrag darstellt, am Boden des Klassierers hindurchlaufen kann. Der wesentliche Parameter im Strömungskanal ist die Gutbeladung $\%_G$. Diese ist der Quotient aus dem Durchsatz \dot{M} und dem effektiven Volumenstrom im Strömungskanal \dot{V}_{ef} , welcher maßgeblich durch die Dispergiereinheit erzeugt wird. Die zulässige Gutbeladung gibt den maximal möglichen Durchsatz bei einer bestimmten Strömung an. Diese kann sich bei verschiedenen Sichtertypen stark unterscheiden. Die zulässige Gutbeladung für die Neuentwicklung wird im nächsten Kapitel untersucht. Die wesentlichen Parameter des Strömungskanals sind in Tabelle 16 zusammengefasst:

Symbol	Bezeichnung	Auslegung des Parameters
L_S	Länge des Strömungskanals	Steht in Relation zur Gutbeladung. Diese wird im nächsten Kapitel untersucht.
h_{DS}	Höhe der Öffnung der Dispergiereinheit zum Strömungskanal	Entspricht ungefähr L_D
h_S	Höhe des Strömungskanals	Entspricht ungefähr $2,67 L_D$
\dot{V}_{ef}	Summe der in den Strömungskanal strömenden Luftströmungen	Entspricht maßgeblich \dot{V}_{DS}
$\%_G$	Gutbeladung	$\%_G = \dot{M} / \dot{V}_{ef}$

Tabelle 16: Zusammenfassung der wesentlichen Parameter des Strömungskanals

Die in den Strömungskanal fließende Strömung muss aus diesem ebenso herausströmen. Dies geschieht mithilfe der Absauge-Einheit. Diese besteht aus einem externen Lüfter, der die Öffnung im Strömungskanal, welche einen Durchmesser d_A aufweist, mit einem Feingutabscheider verbindet und eine Strömung \dot{V}_A erzeugt. Dabei tritt der Energiebedarf P_{Ab} auf, welcher hyperbolisch mit dem erzeugten Volumenstrom ansteigt. Durch die Anordnung der Absauge-Einheit entsteht ein sehr hoher Strömungswiderstand. Die Strömung, die durch den Absauge-Lüfter erzeugt wird, dient hauptsächlich dazu, den Druckverlust, der durch diesen Strömungswiderstand entsteht, auszugleichen. In diesem Fall muss die Absauge-Strömung der Strömung, die durch die

Dispergiereinheit erzeugt wird, entsprechen. Diese Anordnung bietet allerdings auch einen Vorteil. Dieser besteht darin, dass sich durch die Absauge-Strömung eine Trennzone bilden lässt. Dadurch kann gewährleistet werden, dass gröbere Körnungen aus dem Fluid herausfallen und über den Grobgutaustrag ausgetragen werden. Die wesentlichen Parameter der Absauge-Einheit sind in Tabelle 17 zusammengefasst:

Symbol	Bezeichnung	Auslegung des Parameters
\dot{V}_A	Volumenstrom im Absaugekanal	$\dot{V}_A \approx \dot{V}_A = b \pi N n L_D^2 F_{DS}$
d_A	Durchmesser des Absaugekanals	Sollte so gewählt werden, dass die Trennzone nah an der Kanalöffnung liegt und Strömungswiderstände reduziert werden.
v_T	Strömungsgeschwindigkeit in der Trennzone	$v_T = w_{krit} \approx 0,222 \text{ m/s}$
P_{Ab}	Stromaufnahme zur Erzeugung der Absaugeströmung (empirische Gleichung)	$P_{Ab} = 1000 (3000 \dot{V}_A - 35,8 \dot{V}_A + 1,5 \dot{V}_A) + 62$

Tabelle 17: Zusammenfassung der wesentlichen Parameter der Absauge-Einheit

Anhand dieser Zusammenhänge kann die Neuentwicklung in Abhängigkeit der Breite der Bandübergabestation und in Abhängigkeit des Durchsatzes dimensioniert und der Energieverbrauch bestimmt werden. Dazu muss die für den Klassierer zulässige Gutbeladung bestimmt werden. Anhand dieser lässt sich ein Bezug zwischen dem Durchsatz und der Dimensionierung der Dispergiereinheit herstellen. Dabei gilt:

$$\%_G = \frac{\dot{M}}{\dot{V}_{ef}} = \frac{\dot{M}}{b \pi L_D^2 N n F_{DS}} \quad (69)$$

Der für die Bauhöhe des Klassierers wesentliche Parameter ist die Länge der Schlagleisten L_D . Diese lässt sich z. T. aus der Berechnung des benötigten Luftvolumenstroms anhand der zulässigen Gutbeladung ableiten. Damit so ein eindeutiger Bezug hergestellt werden kann, müssen allerdings die Drehzahl n und die Anzahl der Schlagleisten N bestimmt werden.

Die optimale Anzahl der Schlagleisten ist dabei zwei. Dies liegt zum einen daran, dass sich zwei Schlagleisten am Einfachsten an der Drehachse installieren bzw. austauschen lassen. Dies kann z. B. dadurch geschehen, dass die Schlagleisten durch einen Schlitz in der Mitte der Drehachse geschoben werden. Dabei ist nur ein Formteil notwendig, welches mittig befestigt wird. Durch eine einfache Auswechselbarkeit der Schlagleisten wird der Wartungsaufwand reduziert. Da die Schlagleisten einer hohen Beanspruchung ausgesetzt werden und folglich regelmäßig ausgetauscht werden

müssen, ist dies ein wesentlicher Vorteil. Des Weiteren beugt die Verwendung von nur zwei Schlagleisten der Möglichkeit vor, dass die Schlagleisten die Wurfbahnen der Partikel behindern oder dass sich Partikel zwischen den Schlagleisten verfangen. Die Länge der Schlagleisten L_D lässt sich in Bezug zur kritischen Drehzahl der Dispergiereinheit n_{krit} setzen. Diese gibt die minimal benötigte Drehzahl an, um die Partikel mit den oberen F_{krit} Prozent der Schlagleisten zu erfassen:

$$n_{krit} = \frac{\sqrt{v_A^2 + \frac{2}{3} g L_D} + \sqrt{v_A^2 + \left(\frac{2}{3} + 4 F_{krit}\right) g L_D}}{2 N L_D F_{krit}} \quad (70)$$

Wobei v_A die Geschwindigkeit der Partikel nach der Materialaufgabe ist. In Bezug auf die Gutbeladung lässt sich die benötigte Länge der Schlagleisten L_D bei der minimal benötigten Drehzahl und einer Schlagleistenanzahl von 2 wie folgt bestimmen:

$$\frac{\dot{M}}{\%_G} = \dot{V}_{ef} = b \pi L_D \frac{F_{DS}}{2 F_{krit}} \left(\sqrt{v_A^2 + \frac{2}{3} g L_D} + \sqrt{v_A^2 + \left(\frac{2}{3} + 4 F_{krit}\right) g L_D} \right) \quad (71)$$

Aufbauend auf die Bestimmung der Länge der Schlagleisten kann die Bauhöhe und Baugröße des Klassierers bestimmt werden. Die Bauhöhe h entspricht dabei ungefähr der Höhe des Strömungskanals h_s :

$$h \approx h_s \approx 2,67 L_D \quad (72)$$

Die Baugröße V_K ergibt sich aus dem Produkt der Länge L , der Höhe h und Breite b :

$$V_K \approx L h b = 2,67 L_D b (L_s + 2,67 L_D) \quad (73)$$

Wobei sich die Länge des Klassierers aus der Länge des Strömungskanals L_s und der Länge der Dispergiereinheit, welche ca. $2,67 L_D$ entspricht, zusammensetzt.

Anhand der Bauhöhe und der Baugröße kann die Neuentwicklung quantitativ mit dem Stand der Technik verglichen und bewertet werden. Dies erfolgt in Kapitel 7. Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Energieverbrauch P des Klassierers. Dieser setzt sich aus dem Energieverbrauch der Absaugung P_{Ab} und dem Energieverbrauch der Dispergiereinheit zum Wurf der Partikel P_{DW} und zur Strömungserzeugung P_{DS} zusammen. Die Strömung, die durch die Dispergiereinheit erzeugt wird, entspricht dabei der Ab-

saug-Strömung. Die Leistung der Absaug-Einheit konnte aufgrund von hohen Strömungswiderständen nicht zuverlässig bestimmt werden. Daher wird zur Erzeugung der Absaug-Strömung derselbe Energiebedarf wie zu Erzeugung der Strömung durch die Dispergiereinheit angenommen:

$$P \approx P_{DW} + 2 P_{DS} = \frac{2 (\pi n L_D)^2}{\eta} \left(4 \pi \zeta \rho_f n b L_D^2 F_{DS}^3 + \dot{M} \right) \quad (74)$$

Wobei ζ den Strömungswiderstandsbeiwert darstellt, der bei der Versuchsanlage als ca. 36 ermittelt worden ist. η ist der Wirkungsgrad der Anlage und liegt bei der Laboranlage bei ca. 0,35 und ρ_f ist die Fluidichte, die bei ca. 1 kg/m³ liegt. Um diese Gleichungen mit der Trennschärfe in Bezug zu setzen und damit eine Bewertung der Neuentwicklung vollziehen zu können, muss die zulässige Gutbeladung %G bestimmt werden. Dies ist anhand von Laboruntersuchungen durchgeführt worden. Das nächste Kapitel stellt die Ergebnisse der Laboruntersuchungen vor, die zum einen den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Trennschärfe beschreiben und zum anderen der Ermittlung der zulässigen Gutbeladung dienen.

6 Untersuchungen der Trennschärfe und Gutbeladung der Laboranlage

Das vorherige Kapitel stellt die Funktionsweise der Neuentwicklung im Sinne einer Dimensionierung der Laboranlage vor. Darauf aufbauend werden Laboruntersuchungen durchgeführt. Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, den Einfluss verschiedener Parameter des Klassierers auf die Trennschärfe zu untersuchen. Des Weiteren soll die zulässige Gutbeladung labortechnisch bestimmt werden. Anhand der Laboranalysen sollen Auskünfte über die Grenzen, Stärken und Schwächen des Klassierverfahrens abgeleitet werden.

6.1 Einfluss verschiedener Parameter auf die Trennschärfe

Die Trennschärfe ermittelt sich anhand von zwei wesentlichen Größen, die am Grobgut und Feingut gemessen werden können. Diese sind der Fülleranteil im Grobgut nach der Klassierung und der Fehlkornanteil bzw. Spritzkornanteil im Feingut, d. h. Körnungen, die größer als $63\ \mu\text{m}$ sind. Diese Messgrößen lassen sich mittels einer Korngrößenanalyse des Klassierguts vor und nach jedem Klassierprozess ermitteln. Dabei gilt prinzipiell, dass eine hohe Trennschärfe bei einem geringen Fülleranteil im Grobgut und einem geringen Fehlkornanteil im Feingut vorliegt. Bei dem für die Laboruntersuchungen verwendeten Klassiergut handelt es sich um Gabbro-Gesteinskörnungen mit einem Kornspektrum von 0 bis 2 mm und einem Gesteinsfülleranteil von ca. 11,8 %. Das Aufgabegut wird detailliert im Anhang 10: Beschreibung des Klassierguts beschrieben.

Im Zuge einer Testreihe wird der Einfluss je eines Parameters auf die Trennschärfe untersucht. Hierzu werden mehrere Laborversuche durchgeführt. Unter einem Laborversuch ist hierbei die Klassierung des Aufgabeguts unter der Einstellung bestimmter Parameter zu verstehen. Bei den Parametern handelt es sich um den Durchsatz \dot{M} , die Drehzahl der Schlagleisten n , die Länge des Strömungskanals L_s und die Absaugeströmung \dot{V}_A . Jede Testreihe umfasst mehrere Versuche, bei welchen nur einer dieser Parameter variiert wird, während die anderen Parameter nicht verändert werden. Der Einfluss dieser Parameter auf die Trennschärfe ist anhand mehrerer Testreihen bestimmt worden und wird im Folgenden vorgestellt.

Einfluss des Durchsatzes auf die Trennschärfe

Der Durchsatz lässt sich über die Neigung und den Befüllungsgrad der Aufgabeeinheit festlegen. Diese besteht aus einem Behälter, in welchem sich eine definierte Masse des Aufgabeguts befindet. Diese liegt bei den meisten Untersuchungen bei ca. 8 kg, ist aber für die Untersuchungen geringer Massenströme auf 3 kg bzw. 4 kg reduziert worden. Über eine Metallschiene lässt sich der auf eine bestimmte Neigung eingestellte Behälter öffnen und das Aufgabegut strömt heraus. Dabei ändert sich die Aufgabegeschwindigkeit v_A und damit der Massenstrom bzw. Durchsatz \dot{M} . Die Aufgabe erfolgt kontinuierlich und gleichmäßig über die Breite des Klassierers verteilt, wie es bei einer Aufgabe über eine Bandanlage der Fall wäre. Über den Befüllungsgrad des Behälters bzw. die Höhe des Aufgabeguts im Behälter, kann der Massenstrom ebenfalls erhöht bzw. reduziert werden. In diesem Fall verändert sich die Aufgabegeschwindigkeit v_A nicht. Zur Bestimmung des Einflusses der Durchsatzrate auf die Trennschärfe sind mehrere Testreihen durchgeführt worden. Abbildung 42 fasst den Einfluss des Durchsatzes auf die Trennschärfe zusammen:

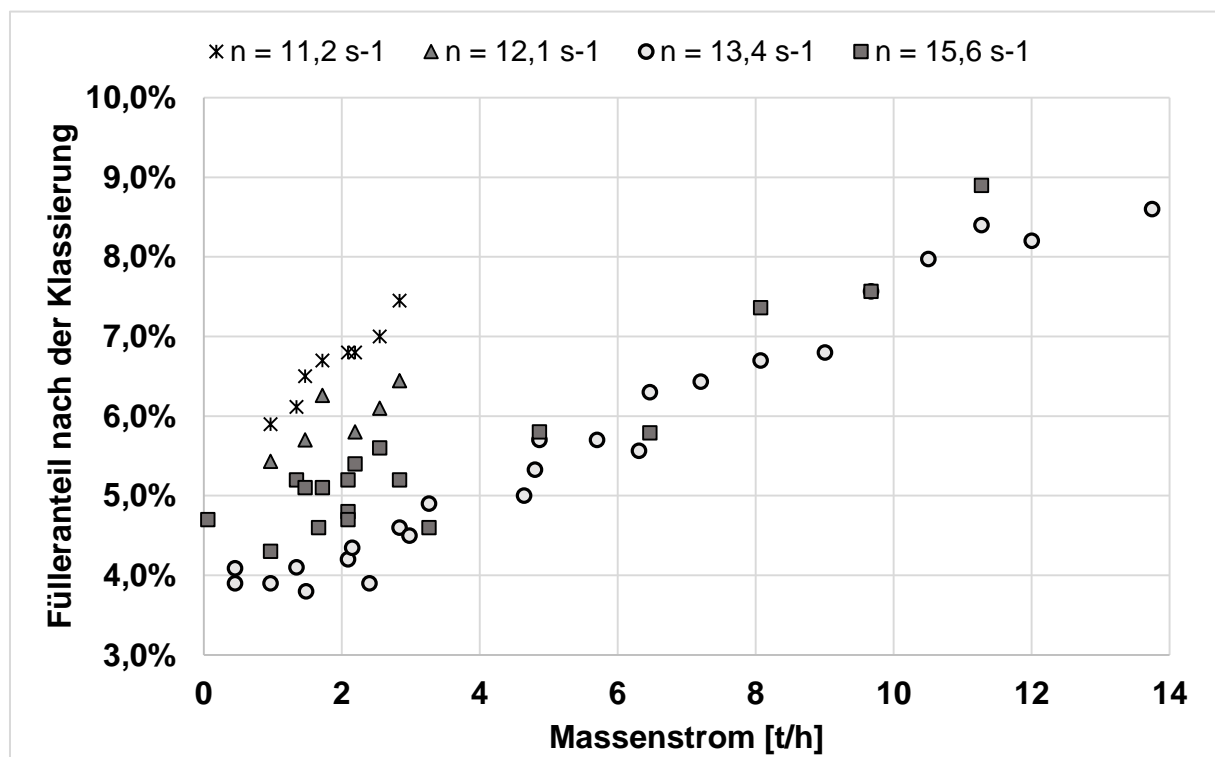


Abbildung 42: Zusammenfassung der Testergebnisse: Einfluss des Durchsatzes auf die Trennschärfe (Ausgangsfülleranteil: 11,8 %)

Diese Testreihen unterscheiden sich durch die eingestellte Drehzahl der Dispergieinheit. Diese ist in einem Bereich von $11,2 \text{ s}^{-1}$ bis $15,6 \text{ s}^{-1}$ eingestellt worden. Die

Stärke der Absauge-Strömung ist dabei an die durch die Dispergiereinheit erzeugte Strömung angepasst worden, bzw. für größere Drehzahlen ab $13,4 \text{ s}^{-1}$ auf ihren maximalen Wert von ca. $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ eingestellt worden. Der zentrale Teil des Strömungskanals ist auf eine Länge von $1,2 \text{ m}$ eingestellt worden. Zur Bestimmung des dargestellten Fülleranteils nach der Klassierung sind mehrere Siebanalysen durchgeführt worden. Die dargestellten Werte sind die Mittelwerte dieser Messdaten. Untersuchungen bei denen stark abweichende Messwerte aufgetreten sind, welche auf Fehler bei den Versuchen oder Messungen schließen ließen, sind wiederholt worden.

Die Massenströme bzw. Durchsatzraten sind bei den Versuchen in einem Bereich von $0,06 \text{ t/h}$ bis $13,74 \text{ t/h}$ variiert worden. Der Füllergehalt lässt sich mit der Laboranlage auf bis zu $3,8 \%$ reduzieren. Eine Reduzierung des Fülleranteils auf ca. 4% bis 5% ist bis zu einem Durchsatz von ca. 3 t/h möglich. Die Drehzahl der Dispergiereinheit und die damit verbundene Strömung im Klassierraum beeinflussen die Trennschärfe. Bei einer Drehzahl von $13,4 \text{ s}^{-1}$ lässt sich die höchste Trennschärfe realisieren. Dies liegt unter anderem daran, dass die Strömung, die durch die Dispergiereinheit erzeugt wird, bei dieser Drehzahl der maximalen Absauge-Strömung entspricht. Wird nun die Drehzahl weiter erhöht, reicht die Absauge-Strömung nicht mehr aus, um das im Fluid angereicherte Feingut effektiv abzuziehen. Wird die Drehzahl allerdings reduziert, nimmt die Trennschärfe ebenfalls ab. Bei einer Drehzahl von $11,2 \text{ s}^{-1}$ lassen sich bei Massenströmen von bis zu 3 t/h um ca. 3% höhere Fülleranteile im Grobgut messen. Bei den beschriebenen Untersuchungen konnte der Fülleranteil nicht weiter als auf ca. 4% reduziert werden. Dies lässt die Annahme zu, dass die Trennschärfe der Testanlage begrenzt ist, bzw. dass mit der Versuchsanlage keine Reduzierung des Gesteinsfülleranteils auf unter diesen Fülleranteil möglich ist. Eine solche Begrenzung kann auf mehrere mögliche Ursachen zurückzuführen sein, wie z. B. die zu geringe Dimensionierung der Absauge-Einheit, die hohen auftretenden Strömungswiderstände und die entgegen der Fluidströmung gerichteten Strömungswiderstände, die besonders das Feingut abbremsen.

Um diese Annahme zu überprüfen, sind Testreihen durchgeführt worden, bei welchen mehrere Versuche in Reihe geschaltet worden sind. Dies bedeutet, dass nach der ersten Untersuchung einer Testreihe, ein erneuter Klassierversuch mit dem Grobgut gestartet wird. Insgesamt werden so je Testreihe drei Iterationen durchgeführt. Nach je-

der Iteration erfolgt eine Korngrößenanalyse. Insgesamt sind sechs Testreihen bei verschiedenen Massenströmen durchgeführt worden. So kann neben der Untersuchung der Systemgrenzen auch die Eignung des Messverfahrens bei höheren Durchsätzen und mehreren in Reihe geschalteten Klassierern abgeschätzt werden. Für die Testreihen ist eine Drehzahl von $13,4 \text{ s}^{-1}$ eingestellt worden – die übrigen Parameter sind so eingestellt worden wie bei den Untersuchungen des Einflusses des Massenstroms. Die untersuchten Massenströme liegen zwischen 3,26 t/h und 11,27 t/h. Die Messergebnisse sind in Abbildung 43 dargestellt:

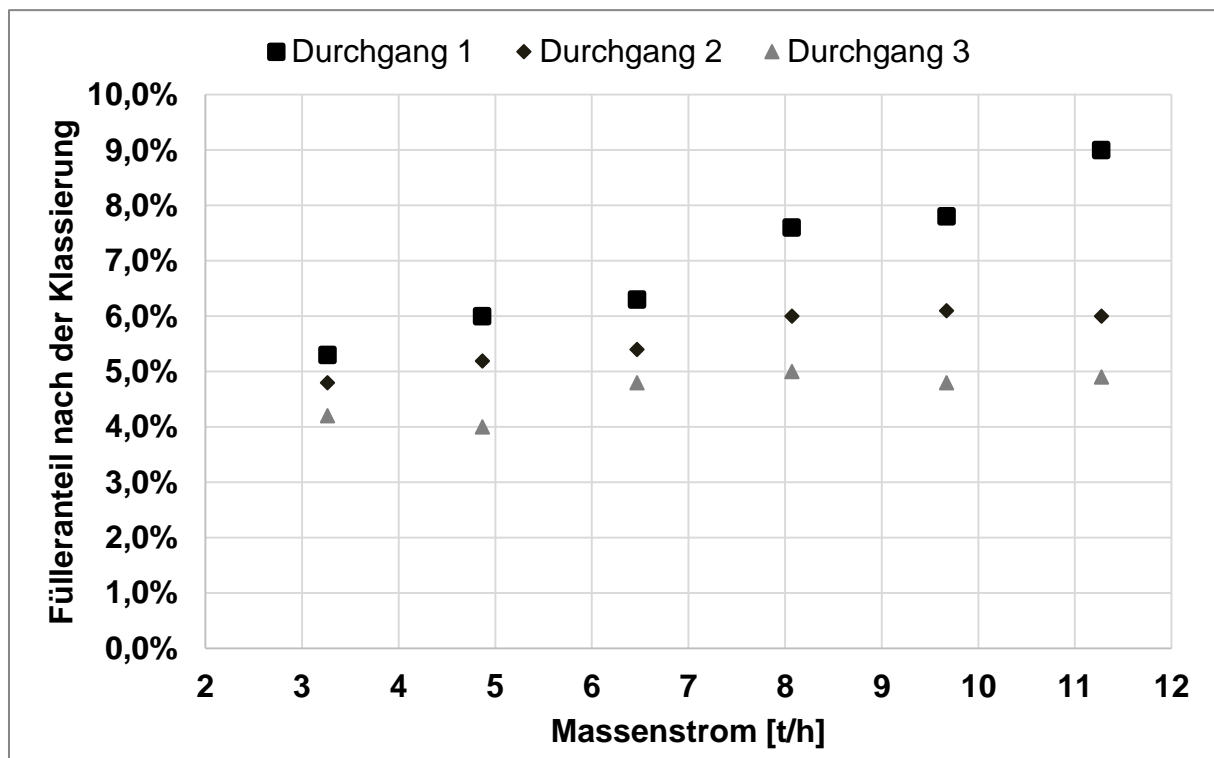


Abbildung 43: Untersuchungsergebnisse der Trennschärfe bei in Reihe geschalteten Klassierprozessen (Ausgangsfülleranteil: 11,8 %)

Bei der dritten Iteration der Testreihen wird der Fülleranteil unabhängig vom Durchsatz auf einen Bereich zwischen 4 % und 5 % reduziert. Dies spricht ebenfalls für eine Begrenzung der Versuchsanlage. Die Eignung der Reihenschaltung mehrerer Klassierer ist durch diese Versuche auch für größere Massenströme gezeigt. Ein Vorteil der Neuentwicklung ist der geringe Fehlkornanteil. Dieser liegt bei allen Versuchen unter 1,2 %.

Einfluss der Drehzahl auf die Trennschärfe

Die Drehzahl der Dispergiereinheit hat einen Einfluss auf die Strömungserzeugung, die Wurfbahnen des Grobguts und die Dispergierung des Feinguts. Die Drehzahl lässt

sich theoretisch bis auf 44,5 Umdrehungen pro Sekunde einstellen. Für die Labortests sind allerdings nur Drehzahlen von bis zu 18 Umdrehungen pro Sekunde getestet worden. Bei höheren Drehzahlen genügt die Absaug-Strömung nicht mehr, um den erzeugten Volumenstrom durch den Absauge-Kanal zu lenken. Infolgedessen tritt die staubbelastete Luft an allen Seiten des Klassierers aus, und eine effektive Klassierung ist nicht möglich. Die Testreihen sind bei verschiedenen Massenströmen durchgeführt worden. Die Länge des zentralen Teils des Strömungskanals ist für die Untersuchungen bei 1,2 m und die Absauge-Strömung bei 0,06 m³/s eingestellt worden. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 44 zusammengefasst:

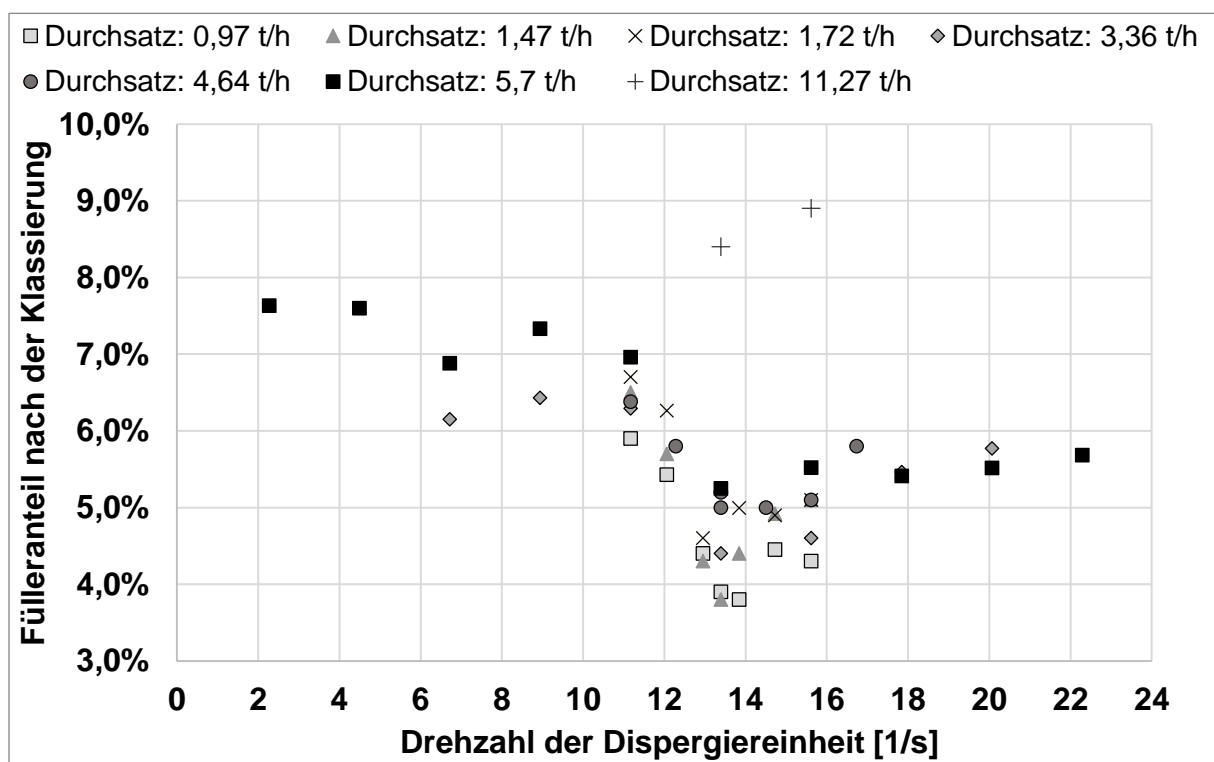


Abbildung 44: Zusammenfassung der Testergebnisse: Einfluss der Drehzahl auf die Trennschärfe (Ausgangsfülleranteil: 11,8 %)

Die Ergebnisse zeigen eine Erhöhung der Trennschärfe bis zu einer Drehzahl von ca. 13 bis 14 Umdrehungen pro Sekunde. Bei den Untersuchungen zeigt sich ebenfalls der Zusammenhang zwischen dem Durchsatz und der Trennschärfe, welcher im vorherigen Abschnitt beschrieben worden ist. Die Trennschärfe nimmt bei höheren Drehzahlen als ca. 14 Umdrehungen pro Sekunde ab. Dies liegt daran, dass die Strömung, die durch die Dispergiereinheit erzeugt wird, ab dieser Drehzahl größer als die Strömung ist, die durch die Absauge-Einheit erzeugt wird. Infolgedessen, kann das sich in der Strömung befindende Feingut nicht komplett ausgetragen werden. Auch bei den

Untersuchungen des Einflusses der Drehzahl auf die Trennschärfe ist kein Fehlkornanteil ermittelt worden, der 1,4 % übersteigt. Tendenziell erhöht sich der Fehlkornanteil mit der Drehzahl, liegt aber im Mittel bei unter 0,5 %.

Für die Laboranlage liegt die optimale Drehzahl bei ca. 13,4 Umdrehungen pro Sekunde. Daraus lässt sich die Relation zwischen der Falltiefe und der Länge der Schlagleisten F_{krit} ableiten. Dieser Faktor liegt bei der Laboranlage bei einer Geschwindigkeit des Aufgabeguts v_A von 0,11 m/s bei 0,189. Das bedeutet, dass die Partikel beim Wurf nur von den oberen ca. 20 % der Schlagleisten erfasst werden bzw. dass deren maximale Falltiefe ca. 20 % der Länge der Schlagleisten entspricht. Die im Labor bestimmte optimale Drehzahl der Dispergiereinheit ist allerdings zumindest teilweise auf die Dimensionierung der Absauge-Einheit zurückzuführen. Bei einer stärkeren Absauge-Strömung ist zu erwarten, dass die optimale Drehzahl höher liegt. Ebenfalls ist die energetische Betrachtung zur Bestimmung einer optimalen Drehzahl nicht berücksichtigt worden. Ebenso ist anzumerken, dass sich das Verhältnis F_{krit} auch durch eine Veränderung der Aufgabegeschwindigkeit v_A verändern kann. In Kapitel 7 erfolgt eine Simulation der Baugröße und des Energieverbrauchs der Neuentwicklung bei verschiedenen Durchsätzen. Für diese Simulation wird ein Wert für F_{krit} von 20 % angenommen. Dieser Wert dient dazu, eine Relation zwischen der Drehzahl und der Länge der Schlagleisten herzustellen.

Einfluss der Strömung der Absauge-Einheit auf die Trennschärfe

Die Absauge-Strömung dient dazu, das Fluid, in welchem sich das Feingut angereichert hat, aus dem Klassierraum zu entfernen und zum Feingutaustrag zu transportieren. Im Labor lassen sich Volumenströme am Eingang zum Strömungskanal von bis zu ca. 0,06 m³/s realisieren. Der Einfluss der Absauge-Strömung auf die Trennschärfe ist mit verschiedenen Testreihen untersucht worden. Für diese Testreihen ist eine Drehzahl der Dispergiereinheit von 13,4 Umdrehungen pro Sekunde und eine Länge des Strömungskanals von 1,2 m gewählt worden. Die vier Testreihen sind bei unterschiedlichen Durchsatzraten, nämlich 1,34 t/h, 2,08 t/h, 4,86 t/h und 5,7 t/h, durchgeführt worden. Die Testergebnisse sind in Abbildung 45 zusammengefasst dargestellt:

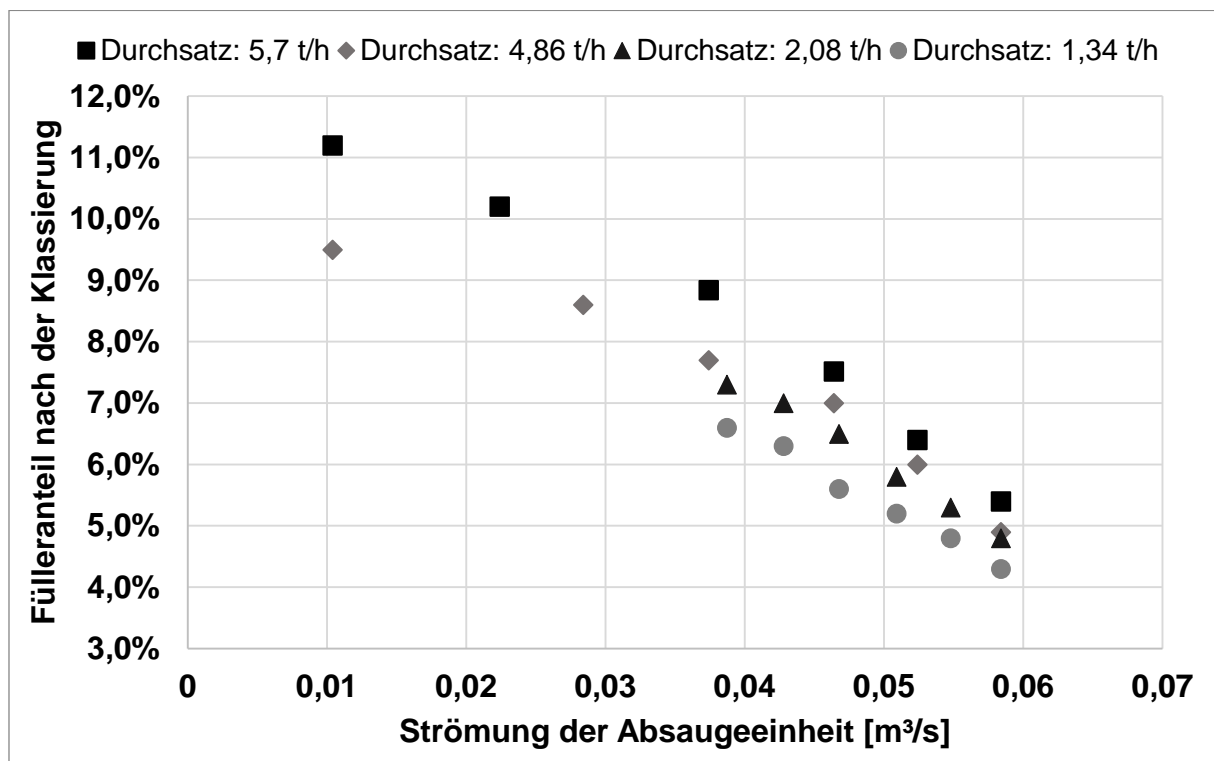


Abbildung 45: Zusammenfassung der Testergebnisse: Einfluss der Absauge-Strömung auf die Trennschärfe (Ausgangsfülleranteil: 11,8 %)

Die Testergebnisse zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen der Trennschärfe und der Strömung, die durch die Absauge-Einheit erzeugt wird. Die Trennschärfe nimmt mit einer Erhöhung dieser Strömung zu. Die Abhängigkeit zwischen der Trennschärfe und dem Durchsatz ist auch bei diesen Messergebnissen zu erkennen. Bei sehr geringen Absauge-Strömungen und vergleichsweise hohen Durchsätzen ist keine effektive Klassierung mehr möglich, da ein Großteil des Feinguts mit der Strömung an allen Seiten der Anlage herausströmt, was in einer hohen Staubbelastung resultiert. Dies liegt daran, dass die geringe Absauge-Strömung nicht ausreicht, um die Strömungswiderstände, die mit der Absauge-Einheit einhergehen, zu kompensieren. Deswegen ist es bedeutend, dass die Absauge-Strömung an die Strömung der Dispergieinheit angepasst ist.

Je nach Durchsatz ist der Fülleranteil bei einer maximalen Strömung von ca. 0,06 m³/s auf zwischen 4,3 % und 5,4 % reduziert worden. Der Trend lässt den Schluss zu, dass der Fülleranteil mit einer weiteren Erhöhung der Absauge-Strömung noch weiter reduziert werden könnte. Die Systemgrenzen, die sich z. B. bei den Untersuchungen des Einflusses durch die Drehzahl bemerkbar gemacht haben, sind folglich zumindest zum Teil auf die Begrenzung der Absauge-Strömung der Laboranlage zurückzuführen. Der

Fehlkornanteil liegt bei allen Versuchen unter 1,6 %, nimmt aber tendenziell mit der Stärke der Absauge-Strömung leicht zu.

Einfluss der Länge des Strömungskanals auf die Trennschärfe

Der Strömungskanal ist in mehreren Segmenten aufgebaut. Dadurch kann die Länge des Kanals zwischen der Kanalkrümmung und der Dispergiereinheit in Schritten von 20 cm variiert werden. Für die Laboruntersuchungen sind Längen des Strömungskanals zwischen 0,4 m und 1,2 m bei einer Drehzahl der Dispergiereinheit von 13,4 Umdrehungen pro Sekunde und einer Strömung der Absaugung von 0,06 m³/s untersucht worden. Dafür sind insgesamt vier Testreihen mit verschiedenen Durchsatzraten, nämlich 1,07 t/h, 1,96 t/h, 3,26 t/h und 5,7 t/h, durchgeführt worden. Die Ergebnisse der Testreihen sind in Abbildung 46 dargestellt. Die dargestellten Messwerte sind dabei die Mittelwerte von jeweils zehn im Labor bestimmten Messwerten:

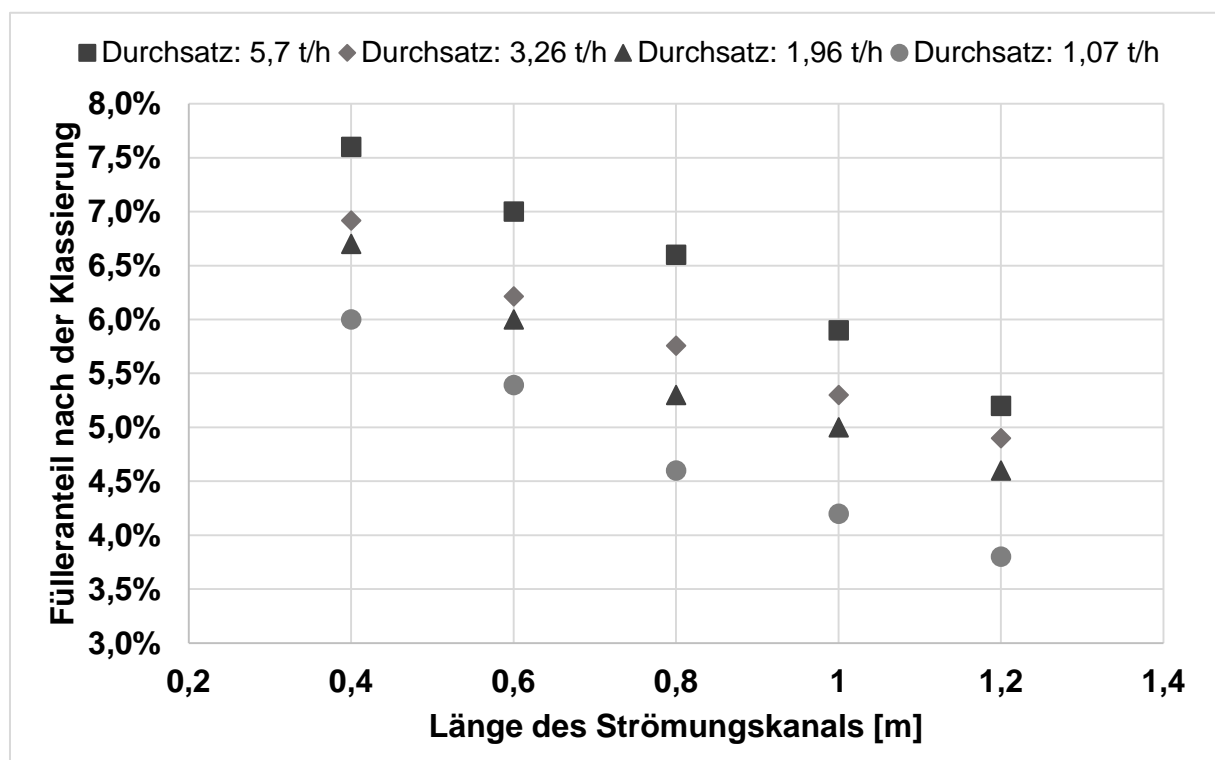


Abbildung 46: Zusammenfassung der Testergebnisse: Einfluss der Länge des Strömungskanals auf die Trennschärfe (Ausgangsfülleranteil: 11,8 %)

Die Trennschärfe nimmt mit der Länge des Strömungskanals zu. Bei der maximal im Labor einstellbaren Kanallänge von 1,2 m ist der Füllergehalt auf bis zu 3,8 % bei einem Durchsatz von 1,07 t/h und auf 5,2 % bei einem Durchsatz von 5,7 t/h reduziert worden. Bei einer Kanallänge von 0,4 m wird der Fülleranteil lediglich auf 6 % bzw. 7,6 % reduziert. Vergleicht man die verschiedenen Messreihen, so ist Fülleranteil nach

der Klassierung bei einer Kanallänge von 1,2 m zwischen 21 % und 37 % geringer als bei einer Kanallänge von 0,4 m. Die prozentuale Differenz verhält sich dabei invers zur Durchsatzrate. Die Messergebnisse bestätigen, dass die Trennschärfe bei geringeren Durchsatzraten höher ist. Dass die Trennschärfe bei einer höheren Länge des Strömungskanals zunimmt, ist auf die zulässige Gutbeladung des Klassierers zurückzuführen. Die zulässige Gutbeladung nimmt generell mit der Baugröße eines Sichters zu [44] [45]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Strömung und die Partikel auf einem größeren Raum verteilen können. So werden die Interaktionen zwischen den Partikeln reduziert, und der Strömungswiderstand wird gesenkt. Auf der anderen Seite bedeutet eine größere Kanallänge aber auch einen höheren Druckverlust der Strömung z. B. durch Wandreibung. Bei einer optimalen Länge des Strömungskanals gleichen sich diese beiden Faktoren aus. Eine optimale Länge des Strömungskanals lässt sich im Labor nicht exakt bestimmen. Allerdings weist der Trend, der bei den Laboruntersuchungen festgestellt worden ist, auf eine weitere Erhöhung der Trennschärfe bei einer Zunahme der Länge des Strömungskanals hin. Der Fehlkornanteil liegt bei den Untersuchungen zwischen 0 % und 1,2 %, im Mittel bei 0,4 %, und ist tendenziell bei geringeren Längen des Strömungskanals höher.

Fehlkornanteil im Feingut

Bei allen Testreihen ist neben dem im Grobgut verbleibenden Fülleranteil auch der Fehlkornanteil im Feingut gemessen worden. Dieser beschreibt den Anteil der klassierten Körnungen, die größer als die Trennkorngröße sind. Die Ergebnisse sind anhand einer Summenverteilungskurve in Abbildung 47 dargestellt:

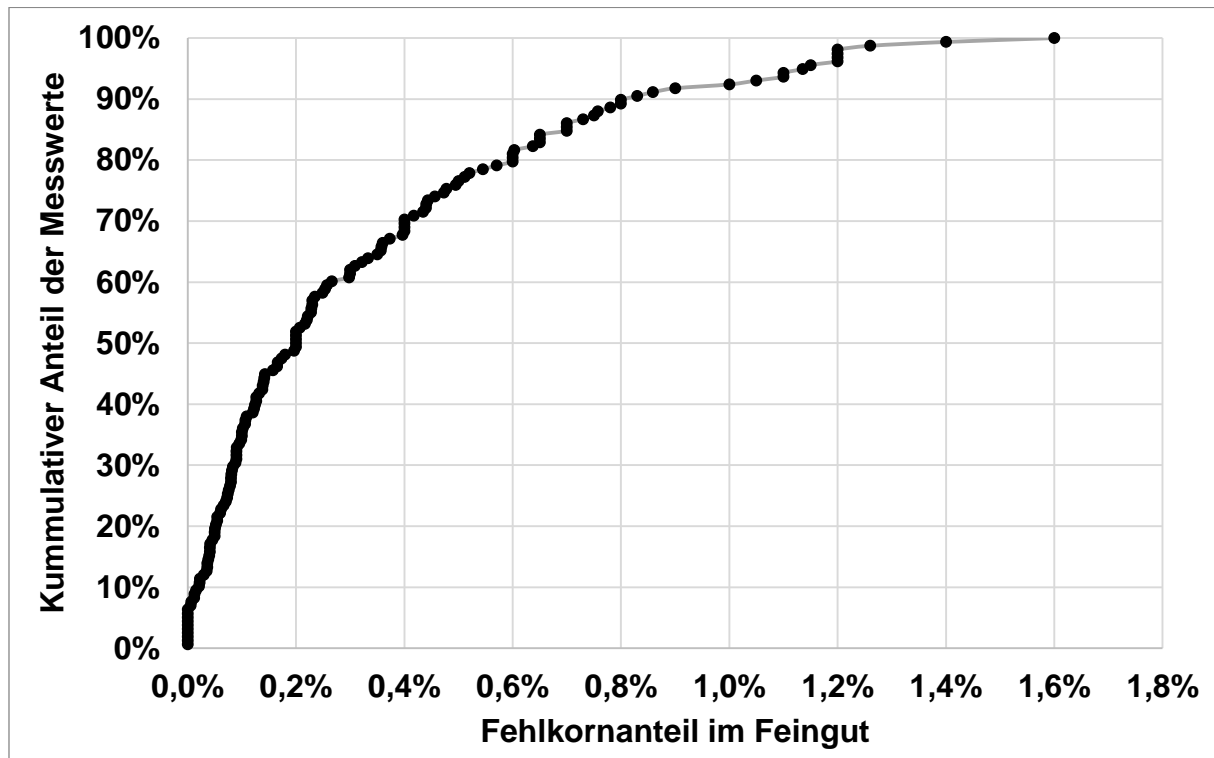


Abbildung 47: Zusammenfassung der Testergebnisse: Fehl Kornanteil ($d > 0,63 \mu\text{m}$) im Feingut

Der Fehl Kornanteil liegt dabei in einem Bereich von 0 % bis 1,6 %. Für 50 % der Messwerte liegt der Fehl Kornanteil sogar unter 0,2 %. Das Fehl Korn weist dabei Korngrößen zwischen $63 \mu\text{m}$ und $125 \mu\text{m}$ auf. Ein derart geringer Fehl Kornanteil spricht für eine hohe Trennschärfe und ist im Vergleich zu anderen Entstaubungsanlagen sehr gering. Gemäß einer Studie der *British Geological Survey* liegt der Fehl Kornanteil bei diesen oftmals zwischen 5 % und 20 %. Da der Fehl Kornanteil unter 3 % liegt, kann das Feingut als feine Gesteinskörnung bezeichnet werden. Hierfür dürfen maximal 3 % der Körnungen größer als $63 \mu\text{m}$ sein, d. h. der d_{97} -Wert der Körnungen muss unter $63 \mu\text{m}$ liegen.

Diesen geringen Fehl Kornanteil erreicht das Verfahren durch die Anordnung der Absaugung, mit welcher eine Trennzone erzeugt wird. Des Weiteren werden durch den Wurfmechanismus gröbere Körnungen gegen die Kanalkrümmung geschleudert und können so nicht von der Absaugung erfasst werden. Aufgrund dieser Korngrößenabhängigen Widerstandskräfte reichern sich nur die feinsten Körnungen infolge der Dispergierung im Fluid an. Dies wirkt sich reduzierend auf den Fehl Kornanteil aus. Allerdings wirkt sich dieser Effekt aber auch begrenzend auf die Trennschärfe aus, da das Klassiergut so nicht komplett entfüllert werden kann.

6.2 Bestimmung der zulässigen Gutbeladung

Für die Bestimmung der zulässigen Gutbeladung sind Testreihen bei verschiedenen Durchsätzen durchgeführt worden. Ebenso fließen die Ergebnisse der vorherigen Testreihen in diese Beurteilung mit ein. Die Gutbeladung ergibt sich aus dem Quotienten des Durchsatzes in kg/s und der Luftströmung in m³/s. Hierbei ist es von Bedeutung, dass die Strömung, die durch die Dispergiereinheit erzeugt wird, an die Strömung der Absauge-Einheit angepasst ist. Versuche, bei denen eine höhere Strömung durch die Dispergiereinheit erzeugt wird als von der Absauge-Einheit abgesaugt werden kann, sind für die Ermittlung der Gutbeladung nicht berücksichtigt worden. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 48 dargestellt:

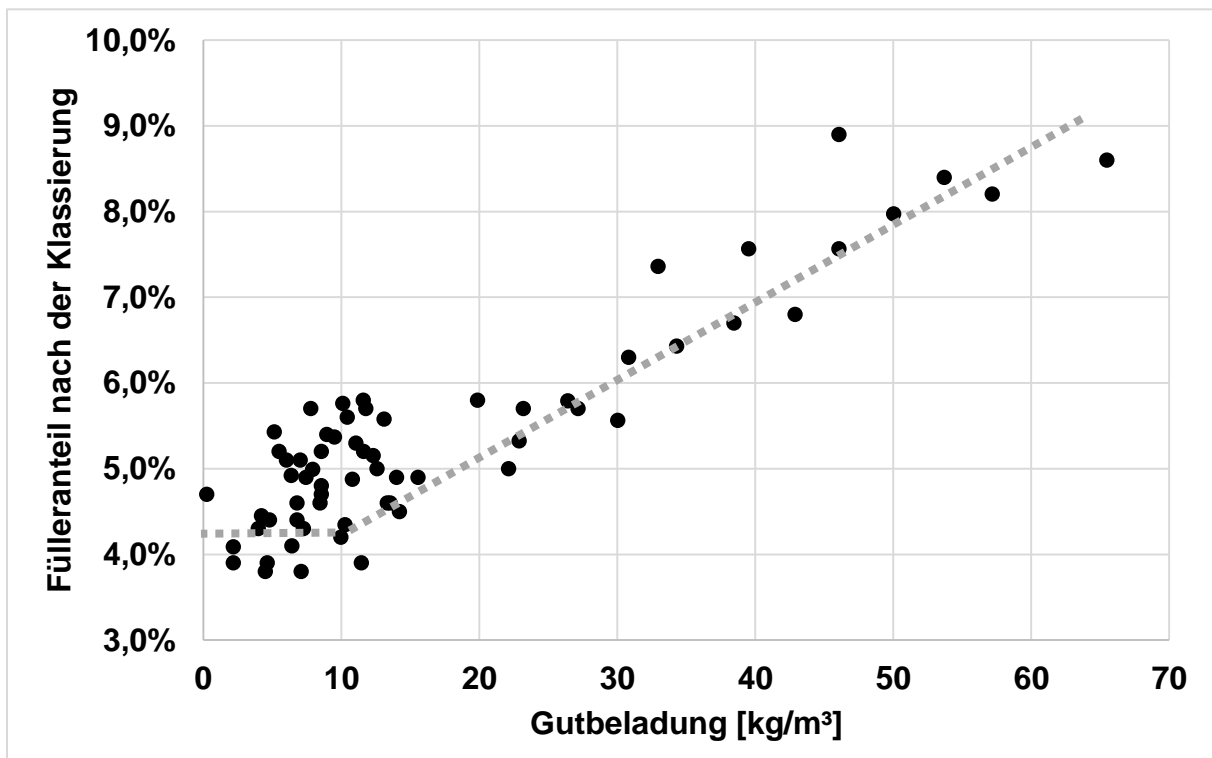


Abbildung 48: Zusammenfassung der Testergebnisse: Einfluss der Gutbeladung auf die Trennschärfe (Ausgangsfülleranteil: 11,8 %)

Die Untersuchungen zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen der Gutbeladung und dem Fülleranteil nach der Klassierung ab einer Gutbeladung von ca. 10 kg/m³. D. h. die Trennschärfe nimmt ab einer Gutbeladung von 10 kg/m³ linear zur Beladungssteigerung ab. Bei Gutbeladungen bis 10 kg/m³ ist keine Korrelation zwischen der Gutbeladung und der Trennschärfe zu erkennen. Der Großteil der Messwerte liegt zwischen 3,8 % und 5 %. Einige Messwerte liegen allerdings zwischen 5 %

und 6 %. Diese Messwerte lassen sich auf Drehzahlen der Dispergiereinheit zurückführen, die geringer als 12 Umdrehungen pro Sekunde sind. Insofern ist ein Einfluss der Drehzahl auf die Trennschärfe gezeigt, der über die Strömungserzeugung hinausgeht.

6.3 Zusammenfassung der Laboruntersuchungen

Anhand der Laboruntersuchungen lassen sich die Systemgrenzen definieren, die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf die Trennschärfe quantifizieren und die zulässige Gutbeladung ableiten.

Zwischen dem Durchsatz und der Trennschärfe, welche bei den Untersuchungen durch den verbleibenden Füllergehalt im Grobgut beschrieben wird, besteht ein linearer Zusammenhang. Dabei kann der Füllergehalt bis auf einen Bereich von ca. 4 % bis 5 % reduziert werden. Eine solche Reduzierung lässt sich bei Massenströmen von bis zu ca. 3 t/h gewährleisten. Wird dieser Durchsatz überstiegen, so nimmt die Trennschärfe ab. Werden mehrere Versuche in Reihe geschaltet, so lässt sich ebenfalls eine maximale Reduzierung des Füllergehalts auf ca. 4 % beobachten. Die Untersuchungen zeigen eine Grenze der Laboranlage bei diesem Wert auf. Dieser Wert ist mit dem Stand der Technik zu vergleichen, nach welchem mit Windsichtern eine Reduzierung des Fülleranteils auf zwischen 2 % und 4 % möglich ist.

Die Trennschärfe nimmt bei einer Erhöhung der Drehzahl der Dispergiereinheit bis zu einer Drehzahl von ca. 13,4 Umdrehungen pro Sekunde zu und danach ab. Dies ist bei verschiedenen Durchsätzen zu beobachten. Die für die Laboranlage optimale Drehzahl scheint also bei 13,4 Umdrehungen zu liegen. Dies wird auf die maximal im Labor realisierbare Strömung der Absauge-Einheit zurückgeführt, welche der Strömung, die durch die Dispergiereinheit bei einer Drehzahl von ca. 13,4 Umdrehungen pro Sekunde erzeugt wird, entspricht. Wird nun eine größere Strömung durch die Dispergiereinheit erzeugt, so kann diese nicht mehr komplett durch die Absauge-Einheit zum Feingutaustrag geleitet werden. Bei einer Drehzahl von 13,4 Umdrehungen pro Sekunde liegt das Verhältnis zwischen der maximalen Falltiefe der Partikel im Wirkungsbereich der Dispergiereinheit und der Länge der Schlagleisten F_{krit} bei ca. 20 %. Anhand diesem Verhältnis kann im folgenden Kapitel ein Zusammenhang zwischen der Drehzahl und der Länge der Schlagleisten hergestellt werden.

Diese Annahme wird durch die Untersuchungen des Einflusses der Strömung durch die Absauge-Einheit auf die Trennschärfe bestätigt. Diese zeigen, dass die Trennschärfe bei einer geringen Absauge-Strömung stark abnimmt. Bei einer hohen Drehzahl der Dispergiereinheit und einer geringen Absauge-Strömung kommt es sogar zur Strömungsumkehrung. Infolgedessen tritt die mit Staub belastete Luft an sämtlichen Ritzen und Öffnungen des Klassierers aus. Die Testwerte legen allerdings nahe, dass die Begrenzung des Systems zu einem Teil maßgeblich von der Begrenzung der Absauge-Strömung abhängt. Bei einer höheren Absauge-Strömung lässt sich eine höhere Trennschärfe erwarten.

Ein weiterer Faktor, der zur Begrenzung des Systems beiträgt, ist die Länge des Strömungskanals und damit die Größe des Klassierraums. Die Trennschärfe nimmt generell mit einer Zunahme der Länge des Strömungskanals zu. Dies kann daran liegen, dass die für das System zulässige Gutbeladung, welche u. a. von der Größe des Klassierraums abhängt, mit einer Zunahme des Volumens des Klassierraums steigt. Allerdings geht eine Zunahme der Länge des Strömungskanals auch mit einer Zunahme des Strömungswiderstands einher. Dies bedeutet, dass mehr Energie zur Strömungserzeugung benötigt werden würde.

Das System zeichnet sich durch einen vergleichsweise geringen Fehlkornantrag aus. Dieser liegt im Mittel bei 0,3 % und überschreitet 1,6 % dabei nicht. Dieser geringe Fehlkornaustrag ist auf die Anordnung der Absaugung, welche eine Trennzone ermöglicht, zurückzuführen. Ebenso werden durch den Wurfmechanismus gröbere Körnung gegen die Kanalkrümmung geschleudert und können so nicht von der Absaugung erfasst werden. Aufgrund dieser korngößenabhängigen Widerstandskräfte reichern sich nur die feinsten Körnungen infolge der Dispergierung im Fluid an. Dies wirkt sich reduzierend auf den Fehlkornanteil aus. Allerdings wirkt sich dieser Effekt begrenzend auf die Trennschärfe aus, da das Material so nicht komplett entfüllert werden.

Die zulässige Gutbeladung des Systems ist als ca. 10 kg/m^3 ermittelt worden. Damit ähnelt sie der Gutbeladung von Gegenstromsichtern, die zwischen 10 kg/m^3 und 20 kg/m^3 liegt. Bei dieser Gutbeladung wird der Fülleranteil auf ca. 4 % bis 5 % reduziert. Dies ist z. B. für Klassierung von Gesteinskörnungen zur Asphaltherstellung optimal. Bei der Asphaltherstellung sollten die klassierten Gesteinskörnungen einen Fülleranteil von 5 % bis 10 % aufweisen.

Diese zulässige Gutbeladung kann durch einige Optimierungen des Systems erhöht werden. Infolge dieser Optimierungen ist zu erwarten, dass ebenfalls Reduzierungen des Gesteinsfülleranteils auf unter 4 % möglich sind. Diese Optimierungen sind die folgenden:

- Eine Erhöhung der Absauge-Strömung durch die Installation eines leistungstärkeren Lüfters und die Reduzierung von Strömungswiderständen. Bei dieser sollte eine kegelförmige Öffnung des Absauge-Kanals installiert werden, mit welcher die Strömungsgeschwindigkeit reduziert wird und sich eine gewünschte Trennzone einstellen lässt. Mit dieser Trennzone kann das Abtrennen von Fehlkorn vermieden werden.
- Eine Erhöhung der Länge des Strömungskanals zur Vergrößerung des Klassierraums. Durch diese kann die zulässige Gutbeladung erhöht werden. Allerdings geht eine Zunahme der Kanallänge auch mit einem erhöhten Strömungswiderstand einher. Eine Erhöhung des Energieverbrauchs ist sowohl bei einer Erhöhung der Länge des Strömungskanals als auch bei einer Erhöhung der Strömung der Absauge-Einheit zu erwarten. Um diese zu beziffern sind weitere Untersuchungen notwendig.
- Eine Reduzierung der Strömungswiderstände bei sämtlichen Komponenten des Klassierers.

Eine Optimierung der Trennschärfe, die eine trennscharfe Reduktion des Gesteinsfülleranteils auf annähernd 0 % ermöglicht, ist mit der vorgestellten Anlagenkonfiguration nicht möglich. Dies liegt daran, dass das Feingut durch korngrößenabhängige Strömungswiderstände entgegen der Strömungsrichtung ausgebremst werden und sich somit verstärkt im vorderen Teil des Strömungskanals ablagern. Dieser Effekt könnte allerdings zu einer Erhöhung der Trennschärfe durch die Installation eines weiteren Feingutaustrags genutzt werden.

7 Analyse der Neuentwicklung

Das vorherige Kapitel stellt die Ermittlung der zulässigen Gutbeladung des Schlagleisten-Querstromsichters vor. Anhand dieser lassen sich die Bauhöhe und Baugröße sowie der Energiebedarf in Abhängigkeit vom Durchsatz berechnen und mit dem Stand der Technik vergleichen. Somit kann sowohl eine qualitative als auch eine quantitative Bewertung des Schlagleisten-Querstromsichters erfolgen.

7.1 Baugröße und Energiebedarf in Relation zum Durchsatz

Die Abschätzung der Bauhöhe und Baugröße ist an die Länge der Schlagleisten L_D gekoppelt. Die Höhe des Dispergierraums, die Höhe des Klassierers und die Länge des Strömungskanals können in Relation zur Länge der Schlagleisten abgeschätzt werden. Für die Abschätzung der Bauhöhe h gilt:

$$h \approx 2,67 L_D \quad (75)$$

Für die Abschätzung der Länge des Klassierers L wird Folgendes angenommen:

$$L \approx 9,67 L_D \quad (76)$$

Wobei sich die Länge des Klassierers aus der Länge der Dispergiereinheit, der Länge des mittleren Teils des Strömungskanals und der Länge der Kanalkrümmung zusammensetzt. Die Baugröße bzw. das Volumen V_K des Klassierers berechnet sich aus dem Produkt der Länge L , Höhe h und Breite b :

$$V_K \approx L h b = 2,67 L_D b (L_S + 2,67 L_D) \quad (77)$$

Die Breite b ist dabei von der Breite der Bandanlagen abhängig und wird für die Berechnungen als 1 m angenommen.

Die benötigte Länge der Schlagleisten lässt sich in Abhängigkeit des Durchsatzes anhand der kritischen Drehzahl n_{krit} bestimmen. Diese ist die für das Werfen der Partikel notwendige Mindest-Drehzahl. Bei den Laboruntersuchungen ist die Mindest-Drehzahl als ca. 13,4 Umdrehungen pro Sekunde bestimmt worden. Dabei ergibt sich eine maximale Falltiefe der Partikel im Wirkungsbereich, die ca. 20 % der Länge der Schlagleisten entspricht. Der Quotient aus dieser Falltiefe und der Länge der Schlagleisten bei der kritischen Drehzahl wird als F_{krit} bezeichnet. Mit diesem Quotienten kann die

benötigte Länge der Schlagleisten in Abhängigkeit des Durchsatzes mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\frac{\dot{M}}{\%_G} = b \pi L_D \frac{F_{DS}}{2 F_{krit}} \left(\sqrt{v_A^2 + \frac{2}{3} g L_D} + \sqrt{v_A^2 + \left(\frac{2}{3} + 4 F_{krit} \right) g L_D} \right) \quad (78)$$

Wobei die zulässige Gutbeladung $\%_G$ 10 kg/m³ beträgt. Bei dieser Gutbeladung erfolgt eine mit anderen Windsichtern vergleichbare Reduzierung des Gesteinsfülleranteils. Der Faktor F_{DS} , der die Effizienz der Dispergiereinheit zur Strömungserzeugung angibt, ist im Labor mit 0,13 bestimmt worden. Dieser Faktor kann maximal 1 betragen. Durch eine Reduzierung der Strömungswiderstände ist eine Erhöhung dieses Faktors möglich. Die Geschwindigkeit nach der Materialaufgabe v_A lässt sich aus der Geschwindigkeit der Bandanlage, dem Massenstrom, der Schüttdichte der Partikel (ca. 1750 kg/m³), der Breite des Klassierers b und der Höhe des Förderstroms h_A ableiten, welche basierend auf die Laboruntersuchungen als ein Zehntel der Länge der Schlagleisten angenommen wird. Dabei gilt für v_A der folgende vereinfachte Zusammenhang:

$$v_A = \frac{\dot{M}}{b h_A} \frac{F_B}{\rho_P} \approx \frac{\dot{M}}{b 0,2 L_D} 0,0057 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (79)$$

Aufbauend auf diesen Annahmen, Faktoren und Parameter lässt sich die benötigte Länge der Schlagleisten für verschiedene Durchsätze berechnen. Abbildung 49 stellt den Zusammenhang zwischen der berechneten Länge der Schlagleisten und dem jeweiligen Durchsatz dar:

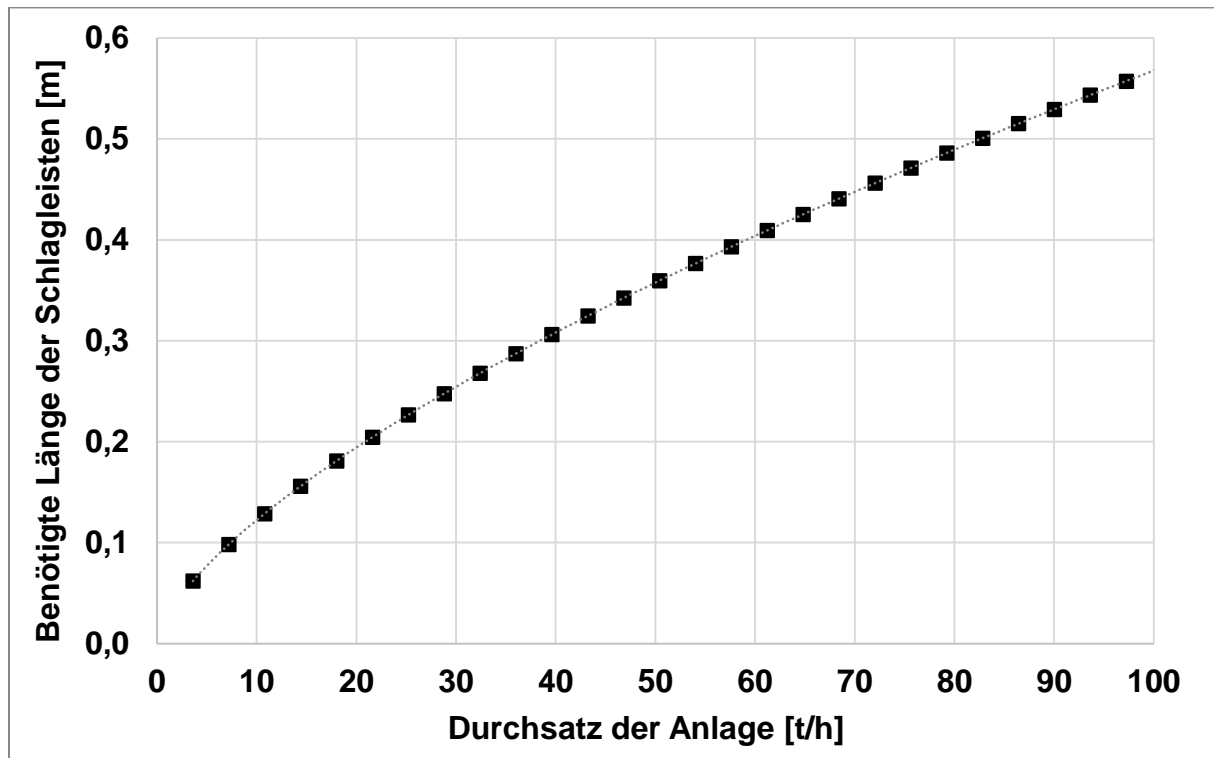


Abbildung 49: Berechnung der benötigten Länge der Schlagleisten in Abhängigkeit des Durchsatzes

Gemäß diesen Berechnungen nimmt die Länge der Schlagleisten mit dem Durchsatz zu. So steigt die benötigte Länge der Schlagleisten bei einem gewünschten Durchsatz von 100 t/h auf ca. 0,57 m an. Dieser Zusammenhang kann durch folgende Gleichung vereinfacht werden:

$$L_D \approx 0,073759 \left(\frac{\dot{M}}{\%_G F_{DS} b} \right)^{0,6667} \quad (80)$$

Bei dieser Gleichung werden die wesentlichen Parameter für die Dimensionierung berücksichtigt. Diese sind zum einen der Faktor F_{DS} und die zulässige Gutbeladung $\%_G$. F_{DS} gibt den Quotienten aus der erwarteten Strömung, die durch die Dispergiereinheit erzeugt wird, und der tatsächlichen im Labor gemessenen Strömung an. Dieser Faktor ist mit einem Wert von 0,13 sehr gering. Dieser geringe Wert resultiert aus auftretenden Strömungswiderständen. Die zulässige Gutbeladung $\%_G$ ist mit ca. 10 kg/m³ vergleichbar zu anderen Sichern. Allerdings gilt diese Gutbeladung für das Laborsystem, welches noch einige erhebliche Beschränkungen in der Dimensionierung aufweist. Durch eine Optimierung der Dimensionierung des Verfahrens, z. B. durch die Reduktion von Strömungswiderständen, einer Vergrößerung des Klassierraums und einer Optimierung der Absauge-Vorrichtung ist mindestens eine Verdopplung dieser beiden

Faktoren realistisch. Da beide Faktoren linear mit dem für eine bestimmte Länge der Dispergiereinheit möglichen Durchsatz zusammenhängen, würde eine Verdopplung beider Faktoren einen vierfachen möglichen Durchsatz bei einer bestimmten Länge der Schlagleisten bedeuten. Ebenso verhält es sich mit der Breite der Bandanlage **b**. Eine Erhöhung der Breite stellt zudem eine weitere Option dar, um die Bauhöhe zu reduzieren.

Die Bauhöhe und das Bauvolumen sind in Abhängigkeit des Durchsatzes in Abbildung 50 dargestellt. Die Berechnungen beziehen sich dabei weiterhin auf den nicht optimierten Ist-Zustand der Laboranlage:

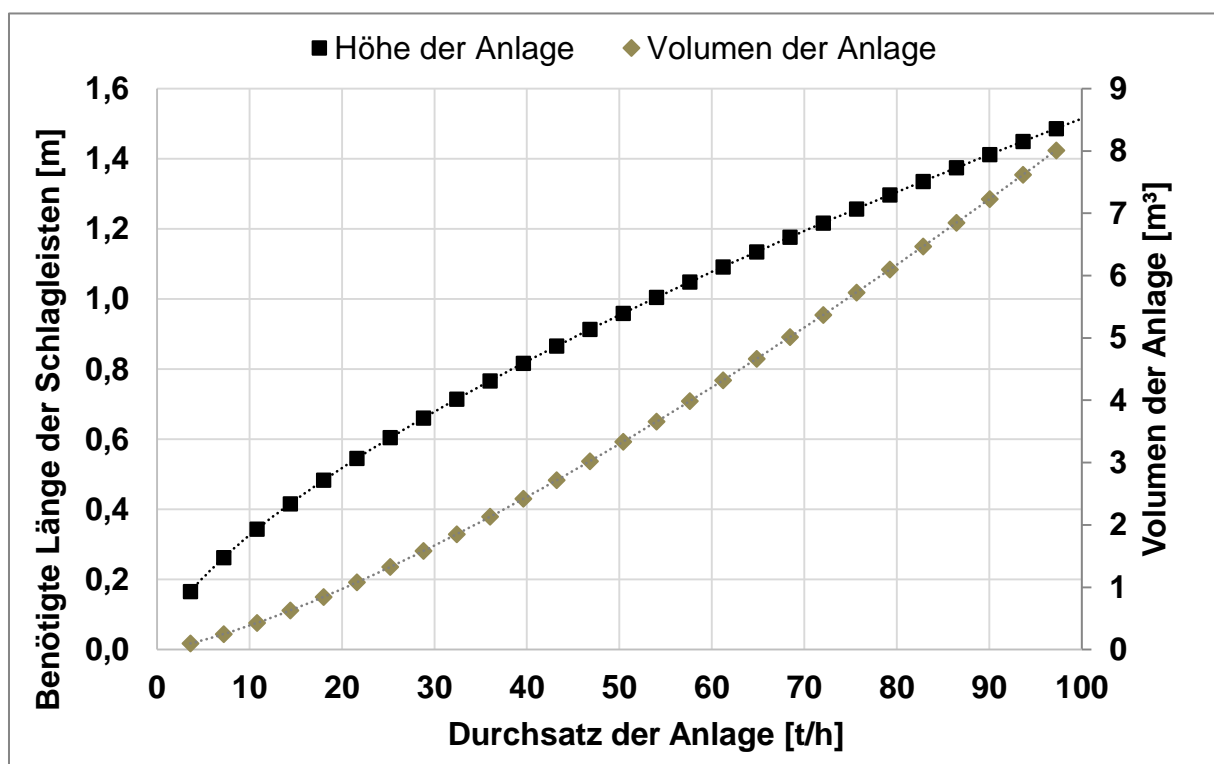


Abbildung 50: Berechnung der Bauhöhe und des Anlagenvolumens in Abhängigkeit des Durchsatzes

Bis zu einem Durchsatz von 100 t/h erhöht sich die erwartete Bauhöhe auf bis zu 1,5 m. Die Zunahmerate nimmt dabei mit größeren Durchsatzraten ab. Das Anlagenvolumen wird bei diesem Durchsatz bei über 8,5 m³ berechnet. Dieses Volumen würde eine Länge des Strömungskanals von ca. 7,25 m voraussetzen. Mit einer derart hohen Länge würden allerdings auch hohe Strömungswiderstände einhergehen. Ebenfalls würde eine derart hohe Länge die Weite der Partikelwurfbahnen überschreiten. Insofern scheint die Annahme, die Länge des Strömungskanals bei den Berechnungen an die Länge der Schlagleisten zu koppeln, fragwürdig, und weitere Untersuchungen, die

eine bessere Modellierung ermöglichen, sind zu empfehlen. Ebenso muss hierbei angemerkt werden, dass sich die Länge und das Volumen des Klassierers durch eine Reduzierung der Strömungswiderstände reduzieren ließe. Durch Optimierungen, die in eine Verdopplung von η_G und F_{DS} resultieren, könnte bei einem Durchsatz von 100 t/h eine Bauhöhe von gerade einmal bei ca. 1,1 m und ein Volumen von 4 m³ erreicht werden. Selbst ohne solche Optimierungen ist der Schlagleisten-Querstromsichter durch seine Niedrigbauweise für den Einsatz bei Bandübergaben geeignet.

Neben der Baugröße ist der Energiebedarf ein weiterer wesentlicher Faktor. Der Energiebedarf der Anlage lässt sich in Abhängigkeit des Durchsatzes über folgende Gleichung ermitteln:

$$P \approx \frac{2 (\pi n L_D)^2}{\eta} \left(4 \pi \zeta \rho_f n b L_D^2 F_{DS}^3 + \dot{M} \right) \quad (81)$$

Die Drehzahl n lässt sich dabei über den Faktor F_{krit} durch die Länge der Schlagleisten substituieren. Der Wirkungsgrad der Anlage η bei einem industriellen Einsatz wird als 0,7 angenommen. Der Widerstandsbeiwert ζ wird basierend auf den Laboruntersuchungen als 36 und der Faktor F_{DS} als 0,13 angenommen. Für den industriellen Einsatz sind eine Reduktion des Strömungswiderstandsbeiwerts und eine Erhöhung der Effizienz der Dispergiereinheit bei der Strömungserzeugung zu erwarten. Die Fluidichte ρ_f beträgt ca. 1 kg/m³. Die Länge der Schlagleisten und damit die minimal benötigte Drehzahl lassen sich in Abhängigkeit des Massenstroms berechnen. Basierend auf diesen Parametern und Annahmen ergibt sich der folgende Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch und dem Durchsatz der Anlage:

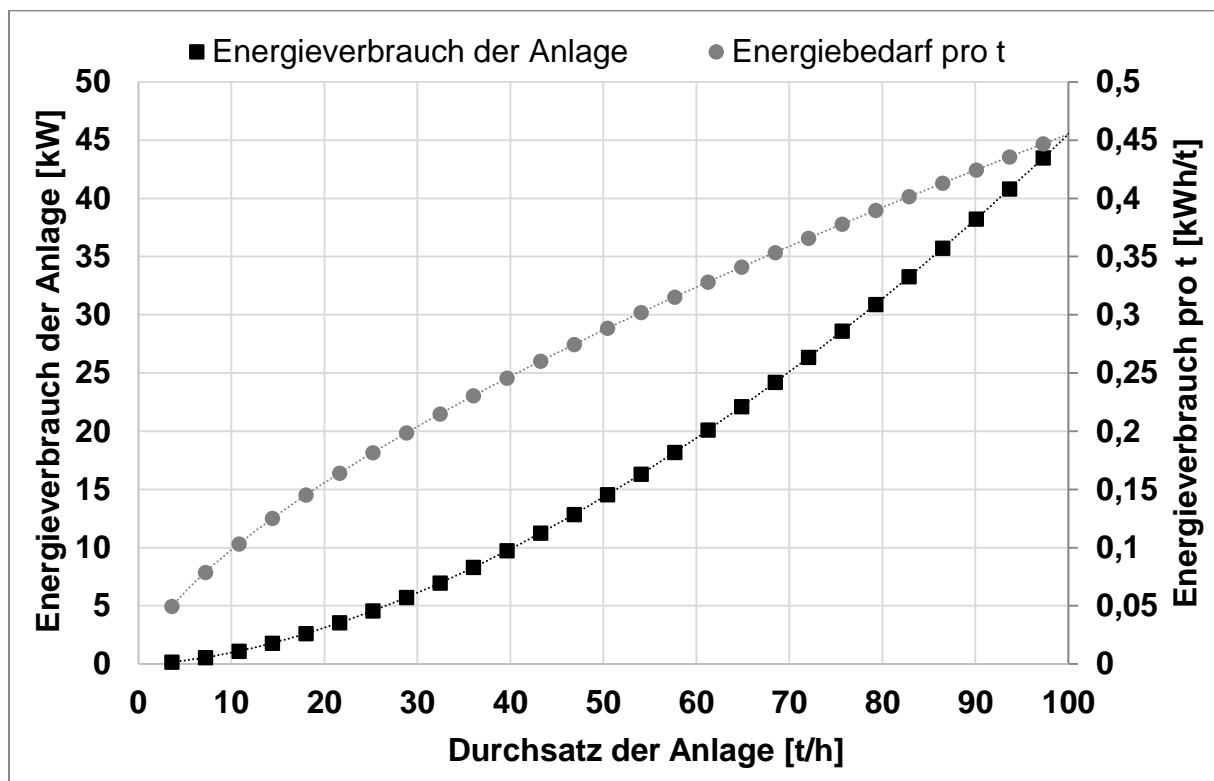


Abbildung 51: Berechnung des Energieverbrauchs in Abhängigkeit des Durchsatzes

Der Energieverbrauch steigt hyperbolisch mit dem Durchsatz der Anlage an. So erreicht der Energieverbrauch der Anlage 15 kW bei einem Durchsatz von 50 t/h. Dies entspricht einem Energiebedarf von 0,33 kWh/t. Bei einem Durchsatz von 100 t/h steigen die benötigte Anlagenleistung auf knapp 45 kW und der Energiebedarf auf 0,45 kWh/t an. Allerdings sind die Berechnungen des Energieverbrauchs der Anlage an einen sehr hohen Strömungswiderstandsbeiwert und eine geringe Gutbeladung gekoppelt. Eine Optimierung der Anlage, welche in einer Verdopplung der zulässigen Gutbeladung und einer Verdopplung der Effizienz bei der Strömungserzeugung sowie einer Halbierung des Strömungswiderstands resultieren kann, würde den Energiebedarf um ca. 60 % reduzieren. Eine derartige Optimierung der Anlage ist machbar. Abbildung 52 stellt den Unterschied zwischen den Kennlinien der Anlagengröße und der Anlagenleistung für den optimierten und nicht optimierten Fall dar:

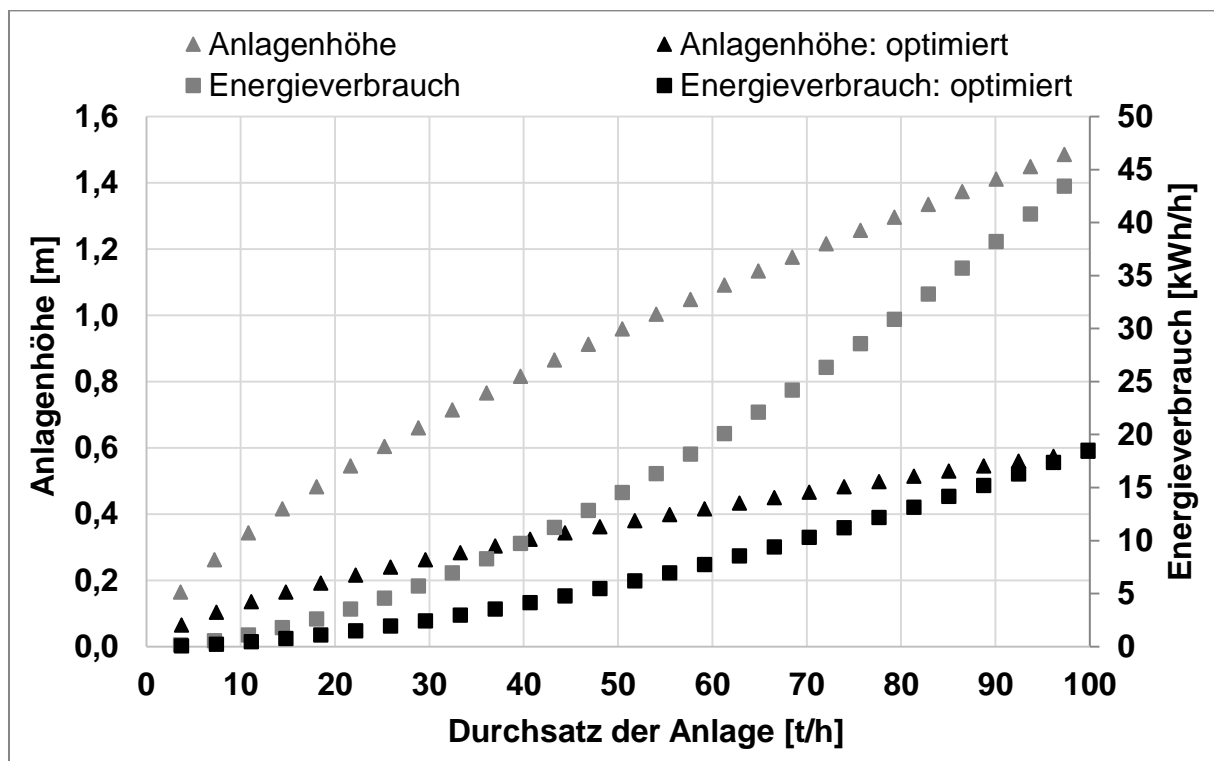


Abbildung 52: Einfluss einer Anlagenoptimierung auf die Anlagenhöhe und die Leistung

Der Vergleich der Anlagenkennlinien zeigt einen wesentlichen Unterschied zwischen dem optimierten und nicht optimierten Zustand. Durch eine Optimierung der Strömungsverhältnisse können der Energieverbrauch und die Anlagenhöhe um ca. 60 % reduziert werden. Dies bedeutet eine Reduktion des Energieverbrauchs von ca. 45 kW auf ca. 18 kW bei einem Durchsatz von 100 t/h bzw. eine Höhenreduktion von 1,5 m auf 0,6 m. Im nachfolgenden Abschnitt wird der neuentwickelte Schlagleisten-Querstromsichter sowohl quantitativ als auch qualitativ mit dem Stand der Technik verglichen. Für diesen Vergleich werden sowohl die Kennlinien, die sich auf die aktuellen Strömungsbedingungen beziehen, als auch die Kennlinien, die sich auf die optimierten Strömungsbedingungen beziehen, betrachtet.

7.2 Bewertung der Neuentwicklung

Im dritten Kapitel dieser Arbeit ist der Stand der Technik beschrieben worden. Dabei sind verschiedene Klassierverfahren erläutert und miteinander verglichen worden. Aufbauend auf die Ermittlung der Kennlinien des Schlagleisten-Querstromsichters erfolgt in diesem Kapitel zunächst eine quantitative Bewertung dieser Neuentwicklung. Dabei werden die Bauhöhe und der Energieverbrauch der Anlage sowohl im Laborzustand als auch in einem optimierten Zustand betrachtet. Dieser Bewertung liegt die im An-

hang 8: Quantitative Analyse des Stands der Technik dargelegte Datenanalyse zugrunde. Anschließend erfolgt eine qualitative Bewertung der Neuentwicklung, welche ebenfalls auf die Optimierungspotenziale und die Nachteile dieser eingeht.

Quantitative Bewertung der Neuentwicklung

Anhand der quantitativen Bewertung der Neuentwicklung in Abgrenzung zum Stand der Technik kann die technisch-wirtschaftliche Eignung der Neuentwicklung gemäß der Zielsetzung geprüft werden. Hierfür werden Kennlinien der Neuentwicklung mit dem Stand der Technik verglichen und bewertet. Der Stand der Technik wird durch Datenpunkte aus einer eigenen Datenerhebung in Abbildung 53 repräsentiert. Der neuentwickelte Schlagleisten-Querstromsichter hingegen, wird durch schwarze, gestrichelte Linien hervorgehoben. Dabei wird sowohl der im Labor bestimmte Strömungszustand der Neuentwicklung als auch ein optimierter Strömungszustand betrachtet. Diese Kennlinien beziehen sich auf die auf die in Kapitel 5 ermittelten Gleichungen und setzen für die Windsichter eine vergleichbare Reduzierung des Gesteinsfülleranteils voraus. Der Vergleich der Bauhöhe ist in Abbildung 53 dargestellt:

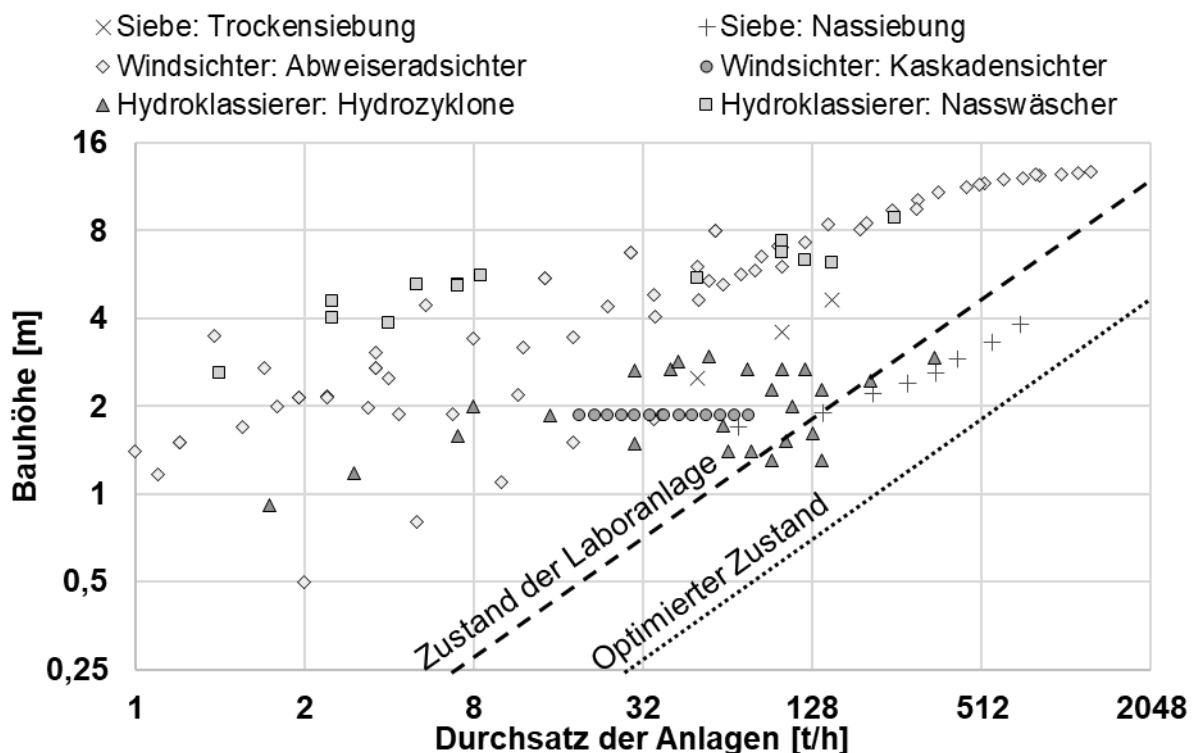


Abbildung 53: Vergleich der Bauhöhe der Neuentwicklung mit dem Stand der Technik

Mit dem Schlagleisten-Querstromsichter lassen sich prinzipiell geringere Bauhöhen als bei anderen Klassierern realisieren. Unter den im Labor bestimmten Strömungsbedingungen weist die Neuentwicklung bis zu einem Durchsatz von 50 t/h mit unter 1,4 m die niedrigste durchsatzspezifische Bauhöhe auf. Für größere Durchsätze ähnelt die Bauhöhe der Neuentwicklung der von Hydrozyklonen und Nass-Siebanlagen. Bei einem Durchsatz von 75,6 t/h gleicht die Bauhöhe der von Kaskadensichtern. Wird allerdings die Anlagenkennlinie unter der optimierten Strömungssituation betrachtet, so lassen sich durchsatzspezifische Bauhöhen feststellen, die sogar etwas geringer als die von Nass-Siebanlagen und Hydrozyklonen sind. In beiden Fällen ist der Schlagleisten-Querstromsichter aufgrund seiner geringen Baugröße für den Einsatz als niedrigbauendes Klassierverfahren, welches z. B. an Bandübergaben in den Förderstrom integriert werden kann, geeignet. Somit lässt sich einer der wesentlichen Ansprüche an die Funktionsweise der Neuentwicklung bestätigen.

Neben der Bauhöhe ist der Energieverbrauch einer Anlage ein entscheidender Faktor für die Bewertung dieser. In Abbildung 54 wird der Energieverbrauchs der Neuentwicklung mit dem Stand der Technik verglichen:

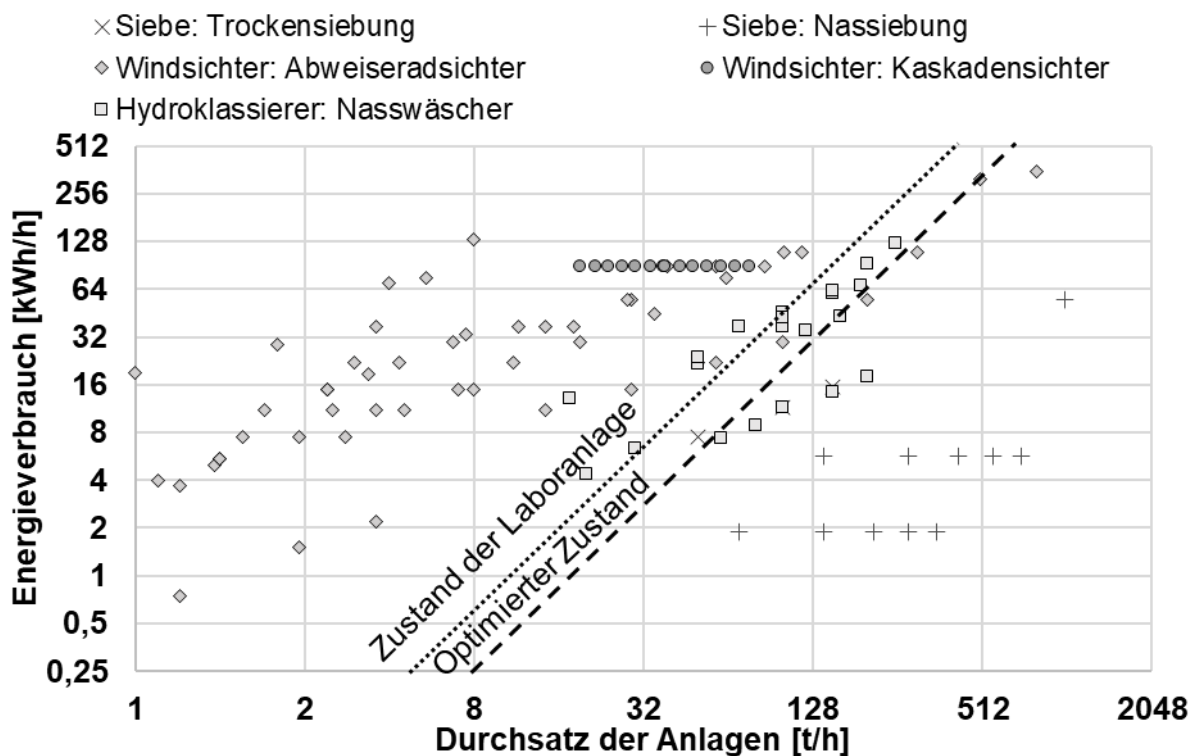


Abbildung 54: Vergleich des Energieverbrauchs der Neuentwicklung mit dem Stand der Technik

Der durchsatzspezifische Energieverbrauch der Neuentwicklung ist für einen Windsichter vergleichsweise gering. Dieser ist sowohl unter den im Labor bestimmten Strömungsbedingungen als auch nach einer Optimierung der Strömungsbedingungen geringer als bei dem meisten Abweiseradsichtern und den Kaskadensichtern. Der Energieverbrauch entspricht für Durchsätze über 20 t/h ungefähr dem Energieverbrauch von Nasswäschern. Lediglich der durchsatzspezifische Energieverbrauch von Siebanlagen ist geringer.

Gemäß der quantitativen Analyse scheint eine Eignung der Neuentwicklung für einen Einsatz in der Industrie gemäß der Zielsetzung gegeben zu sein.

Qualitative Bewertung der Neuentwicklung

Im Zuge der Zielsetzung dieser Arbeit sind Anforderungen an das neuentwickelte Verfahren gestellt worden. Dieses sollte niedrigbauend und energieeffizient sein, die für die Verwendungszwecke benötigte Trennschärfe aufweisen und für höhere Durchsätze geeignet sein. Der Schlagleisten-Querstromsichter kommt diesen Anforderungen nach.

Gemäß der quantitativen Bewertung zeichnet sich das Verfahren durch einen für Windsichter eher geringen Energieverbrauch und eine niedrige Bauweise aus und scheint für mittelhohe Durchsätze bis zu ca. 100 t/h geeignet zu sein. Ein weiterer Vorteil der Neuentwicklung ist der geringe Fehlkornaustag. Dieser liegt unter 3 % und ist damit deutlich geringer als bei einigen Entstaubungsanlagen, welche einen Fehlkornanteil von 5 % bis 20 % aufweisen können [1]. Zudem ist eine bedingte Anpassung der Trennschärfe der Anlage an Änderungen des Durchsatzes oder der Qualitätsanforderung über Änderungen der Drehzahl der Dispergiereinheit und der Strömung der Absaugung möglich. Diesen Stärken der Neuentwicklung stehen allerdings auch drei wesentliche Schwächen gegenüber: ein möglicher Verschleiß der Schlagleisten, eine mögliche Zerkleinerung der Partikel durch den Aufprall und eine Limitierung der Trennschärfe.

Verschleiß

Die erste Schwäche ist der auftretende Verschleiß im Zuge der Dispergierung. Durch den Aufprall zwischen den Partikeln und den Schlagleisten kommt es zwangsläufig zu einer Verformung und zur Abrasion dieser. Die Lebensdauer der Schlagleisten hängt

dabei von der Aufprallgeschwindigkeit, der Abrasivität der Körnungen und dem Material der Schlagleisten ab. Somit weist die Anlagen einen der wesentlichen Vorteile von Windsichtern, die Unanfälligkeit gegenüber Verschleiß, nicht auf. Infolge des Verschleißes müssen die Schlagleisten regelmäßig getauscht werden. Währenddessen müssen die Bandanlagen gestoppt sein. So kann es zu einem Produktionsausfall kommen. Allerdings ist der Wartungsaufwand bei einem Austausch der Schlagleisten deutlich geringer als beim Wechsel von Siebbelägen. Die Schlagleisten sollten aus einem Metallstück gefertigt sein, welches durch einen Schlitz in der Drehachse geschoben und mittig befestigt wird. Beim Austausch muss so nur die Drehachse aus dem Dispergierraum herausgenommen werden und die Schlagleisten müssen gelöst und getauscht werden. Alternativ kann auch die gesamte Drehachse mitsamt den Schlagleisten ausgewechselt werden. So ließe sich die gesamte Wartung mit einem relativ geringen Zeitaufwand realisieren. Bei einem Betrieb, in dem die Produktion schichtbedingt nicht 24 h am Tag läuft, kann die Wartung des Sichters während Produktionspausen geschehen, was einen Produktionsausfall vermeidet. Ebenfalls ist die Verwendung spezieller Formteile aus Gummi oder Kunststoffen denkbar, welche einen direkten Verschleiß des Rotors verhindern können. Zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit der Anlage bedarf es Untersuchungen im industriellen Maßstab. Die Wartungsanfälligkeit der Neuentwicklung ist ein wesentlicher Faktor, der die Wirtschaftlichkeit dieser Anlage beeinflusst.

Zerkleinerung der Partikel

Neben dem Verschleiß der Schlagleisten stellt eine ungewollte Zerkleinerung der Partikelkollektive eine weitere mögliche Einschränkung des Klassierverfahrens dar. Eine solche Zerkleinerung lässt sich vermuten, da die Funktionsweise der Dispergiereinheit der Funktionsweise der rotierenden Schlagleisten von Prallbrechern ähnelt.

Prallbrecher sind Zerkleinerungsmaschinen, die Partikelkollektive mittels Prall auf Korngrößen von minimal einem Millimeter zerkleinern. Sie finden einen Einsatz in der Steine- und Erden-Industrie, um mittelhartes und hartes Gestein zu Schotter, Sand oder Splitt zu verarbeiten [47]. Die Zerkleinerung wird dabei durch einen schnelldrehenden Rotor gewährleistet, an welchem Schlagleisten befestigt sind, die die Partikelkollektive beschleunigen und gegen Prallplatten werfen. Beim Aufprall auf die Prall-

platten sowie auf die Schlagleisten werden die Partikel zerkleinert. Dieser Zerkleinerungsprozess wird innerhalb des Brechers so lange wiederholt, bis die Korngröße soweit reduziert worden ist, dass das Material den Brecher durch einen Spalt zwischen Prallwerk und Rotor hindurchpasst und über diesen ausgetragen werden kann [47].

Die Zerkleinerungsarbeit von Prallbrechern hängt dabei im Wesentlichen von der Umfangsgeschwindigkeit der Schlagleisten beim Aufprall ab. Je nach Einsatzgebiet kann diese zwischen 18 m/s und 70 m/s liegen. Diese Umfangsgeschwindigkeit hängt dabei maßgeblich von der Aufgabekorngröße und der gewünschten Zielkorngröße sowie der Härte des Aufgabeguts ab. Primärprallbrecher werden in der Regel zur Zerkleinerung von mittelharten Gesteinen mit Volumina von über 2 m³ auf Korngrößen unter 120 mm eingesetzt. Dabei werden Umfangsgeschwindigkeiten zwischen 25 m/s und 35 m/s realisiert. Sekundärprallbrecher werden auch für hartes Gestein eingesetzt. Bei Umfangsgeschwindigkeiten zwischen 35 m/s und 48 m/s werden Körnungen mit einer maximalen Größe von 150 mm bis 280 mm auf unter 35 mm zerkleinert. Tertiärprallbrecher werden in der Steine- und Erden-Industrie zur Herstellung von Gesteinskörnungen eingesetzt. Sie zerkleinern das auf unter 20 mm vorzerkleinerte Aufgabegut bei Umfangsgeschwindigkeiten von 55 m/s bis 70 m/s auf unter 4 mm [47].

Bei der Laboranlage erreichen die Schlagleisten bei einer Drehzahl von 13,4 Umdrehungen pro Sekunde eine Umfangsgeschwindigkeit von ca. 19 m/s, was in den unteren Bereich der Umfangsgeschwindigkeiten fällt, welche bei Primärprallbrechern für mittelhartes Gestein realisiert werden. Bei den Untersuchungen im Labor konnte allerdings keine relevante Zerkleinerung der Partikel durch den Aufprall festgestellt werden. Die entsprechenden Untersuchungen sind im Anhang (Anhang 12: Untersuchungen zur Partikelzerkleinerung durch Prall) beschrieben. Dass keine signifikante Zerkleinerung der Partikel bei den Laboruntersuchungen festgestellt werden konnte, lässt sich auf mehrere Gründe zurückführen:

Zum einen erfolgt im Klassierer nur ein einziger Aufprall zwischen den Schlagleisten, welche bei der Laboranlage aus Hautplastik bestehen, und den Partikeln. Ebenso erfolgt kein Aufprall der Partikel mit etwaigen Prallplatten, welcher bei Prallbrechern den wesentlichen Zerkleinerungsmechanismus darstellt. Insofern werden die Partikel bei der Laboranlage deutlich weniger beansprucht als bei einem Prallbrecher.

Zum anderen sind Umfangsgeschwindigkeiten in Relation zur Aufgabekorngröße relativ gering. Wegner legte 2005 in seiner Doktorarbeit einen Zusammenhang zwischen der Partikelgröße, der Umfangsgeschwindigkeit und der Bruchwahrscheinlichkeit dar. Bei dieser ließ sich eine um 40 % geringer Bruchwahrscheinlichkeit bei Partikeln mit einer Korngröße von 60 mm als bei Partikeln mit einer Korngröße von 113 mm feststellen. Seine Untersuchungen zeigen, dass die Bruchwahrscheinlichkeit linear mit der Partikelgröße abnimmt und diese selbst bei Partikelgrößen von „nur“ 60 mm und einer Umfangsgeschwindigkeit von 22 m/s bei knapp 10 % liegt. Als Bruchwahrscheinlichkeit versteht er, wie viele der untersuchten Partikel einen Materialverlust von über 10 % nach dem Prallvorgang aufgewiesen haben. Bei Prallbrechern, die zur Herstellung von Körnungen kleiner als 4 mm verwendet werden, betragen die Umfangsgeschwindigkeiten beispielsweise bis zu 70 m/s. Insofern lässt sich folgern, dass die Umfangsgeschwindigkeiten bei der Laboranlage nicht ausreichen, um die Brechsande effektiv zu verkleinern [48].

Für den industriellen Einsatz ist allerdings der Einsatz von verschleißresistenten Schlagleisten mit einem deutlich höheren Durchmesser vorgesehen, welcher ebenfalls mit höheren Umfangsgeschwindigkeiten einhergeht. Die Relation zwischen der Umfangsgeschwindigkeit der Schlagleisten und dem Durchsatz der Anlage ist in Abbildung 55 dargelegt. Hierbei wird ebenfalls eine Anlagenskalierung unter optimierten Strömungsbedingungen in Betracht gezogen:

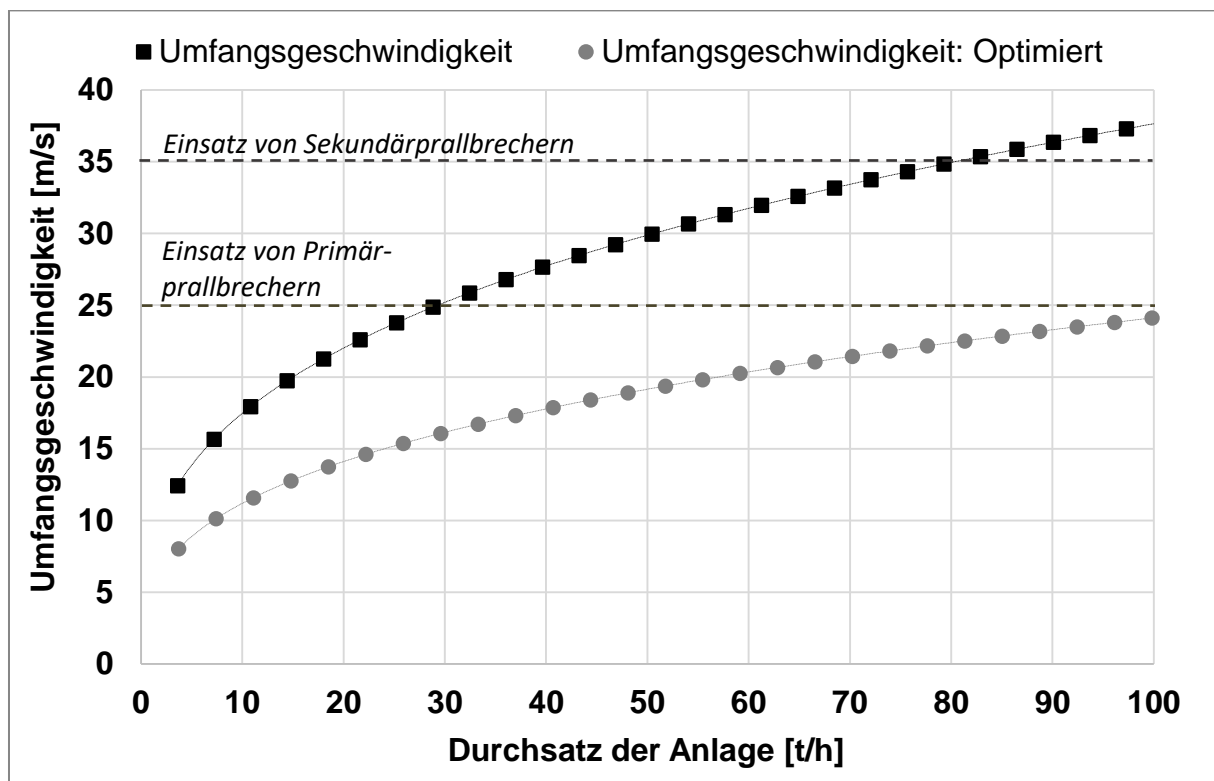


Abbildung 55: Umfangsgeschwindigkeiten der Schlagleisten in Relation zum Durchsatz

Hierbei lässt sich erkennen, dass ohne eine Verbesserung der Strömungsparameter ab einem Durchsatz von ca. 30 t/h Umfangsgeschwindigkeiten von ca. 25 m/s erreicht werden, was in den Bereich der Primärzerkleinerung mit Prallbrechern fällt. Bei einem Durchsatz von über 80 t/h würden sogar Geschwindigkeiten von über 35 m/s erreicht werden, was der Sekundärzerkleinerung zuzuordnen wäre. Zwar beziehen sich diese beiden Zerkleinerungsbereiche immer noch auf deutlich größere Aufgabekorngrößen als 2 mm, allerdings ist bei diesen Umfangsgeschwindigkeiten eine Zerkleinerung von größeren Körnungen nicht auszuschließen. Durch diese könnte es zur Bildung von neuem Gesteinsfüller kommen, was die Eignung des Verfahrens infrage stellen würde. Durch eine Verbesserung der Strömungssituation ließen sich allerdings geringere Längen der Schlagleisten gewährleisten. So könnten Umfangsgeschwindigkeiten unter 25 m/s realisiert werden, wobei keine signifikante Zerkleinerung zu erwarten ist. Ebenfalls kann durch den Einsatz von Gummi- oder Kunststoff- Formteilen, welche auf dem Rotor angebracht werden, sowohl dem Verschleiß an den Schlagleisten als auch einer Zerkleinerung der Partikel vorgebeugt werden. In jedem Fall bedarf für einen Industrie-Einsatz einer genauen Analyse des Zerkleinerungsverhaltens der Partikel durch den Prallmechanismus.

Limitierung der Trennschärfe

Die dritte Schwäche des Klassierers betrifft die Trennschärfe. Während der Laboruntersuchungen konnte der Füllergehalt nicht unter 3,8 % reduziert werden. Dies ist zwar vergleichbar mit dem Stand der Technik, bei welchem eine Reduzierung des Gesteinsfülleranteils auf in der Regel 2 % bis 4 % angestrebt wird, weist aber dennoch auf eine etwas geringere mögliche Trennschärfe hin. Selbst bei in Reihe geschalteten Versuchen, also bei deutlich geringeren Füllergehalten im Aufgabegut, konnte diese Grenze nicht unterschritten werden. Diese Begrenzung resultiert aus den zwei gegensätzlichen Mechanismen, die bei der Klassierung mit der Neuentwicklung auftreten: Infolge der Dispergierung reichert sich ein Teil der Körnungen, insbesondere das Feingut, in der Strömung an, wohingegen ein anderer Teil durch die Schlagleisten geworfen wird. Infolge des Werfens wirken korngrößenabhängige Strömungswiderstandskräfte, die die Wurfgeschwindigkeit der Partikel abbremsen. Diese Kräfte wirken in Relation zur Differenz zwischen der Geschwindigkeit der geworfenen Partikel und der Strömungsgeschwindigkeit. Zudem verdoppeln sich diese Kräfte bei jeder Halbierung der Korngröße. D. h. Partikel mit einem Durchmesser von 63 μm werden ca. doppelt so stark abgebremst wie Partikel mit einem Durchmesser von 125 μm . Im Zuge dessen wird ein Teil des Füllers zwangsläufig aufgrund der Strömungswiderstandskräfte im vorderen Teil des Strömungskanals abgelegt, anstatt von der Strömung zum Feingutaustrag im hinteren Teil des Strömungskanals getragen zu werden. Zwar kann durch eine Verbesserung der Strömungssituation der Anlage, z. B. durch die Reduktion von Strömungswiderständen, verhindert werden, dass Feingut aus der Strömung sedimentiert, allerdings kann der Effekt, dass ein Teil des Feinguts geworfen und dadurch infolge der Strömungswiderstandskräfte im Strömungskanal abgelegt wird, nicht verhindert werden. So ist mit dem Verfahren keine Reduktion des Gesteinsfülleranteils auf 0 % möglich. Eine weitere Möglichkeit, um diesem Effekt entgegenzuwirken, ist die Installation eines weiteren Feingutaustrags im vorderen Teil des Klassierraums. Hierbei muss allerdings eine Erhöhung des Fehlkornanteils vermieden werden.

Allerdings ist für den Verwendungszweck des Klassierers bei der Entfüllung von Gesteinskörnungen eine Reduktion des Gesteinsfülleranteils auf 0 % nicht erforderlich und bringt sogar Nachteile mit sich. Bei der Asphaltherstellung sollte der Gesteinsfülleranteil zwischen 5 % und 10 % liegen. Wird dieser Füllergehalt im Zuge der Klassierung unterschritten, muss sogenannter Fremdfüller der Mischung hinzugeführt werden.

Insofern ist die Limitierung der Trennschärfe des Verfahrens für bestimmte Einsatzgebiete sogar förderlich. Hierzu muss allerdings angemerkt werden, dass die Laboranlage nicht für Gesteinskörnungen mit höheren Fülleranteilen getestet worden ist. Jedoch weisen sowohl die Ergebnisse der in Reihe geschalteten Tests als auch Untersuchungen, die mit einer Pilotanlage durchgeführt worden sind, darauf hin, dass die Grenzfüllergehalte nach der Klassierung unabhängig vom Füllergehalt des Klassierguts bei ca. 4 % liegen. In jedem Fall sind hierzu weitere Untersuchungen notwendig.

Zusammenfassend lässt sich das Verfahren in Abgrenzung zum Stand der Technik wie folgt bewerten: Das Verfahren zeichnet sich durch seine geringe Bauhöhe und seinen für Windsichter geringen Energiebedarf aus. Die geringe Bauhöhe ermöglicht dabei einen Einsatz zur Nachrüstung bestehender Aufbereitungsanlagen, z. B. bei Bandübergabestationen. Basierend auf den Untersuchungen, Recherchen, Berechnungen und Analysen lässt sich eine Eignung des Verfahrens für den Einsatz in der Steine- und Erden- Industrie bestätigen. Allerdings sind weitere Untersuchungen unter Industrie-Bedingungen notwendig. Diese Untersuchungen sollten die in dieser Arbeit aufgezeigten Optimierungsansätze aufgreifen und zur Bestätigung der getätigten Annahmen für größere Massenströme dienen. Die technisch-wirtschaftliche Plausibilität des neuentwickelten Verfahrens kann folglich bestätigt werden.

8 Fazit

Gesteinskörnungen werden zur Baustoffherstellung eingesetzt. Abbau- und aufbereitungsbedingt treten bei der Gewinnung von Gesteinskörnungen Zerkleinerungsprozesse auf, die bis 10 % und 20 % auf Korngrößen unter 63 µm zerkleinern. Diese Kornfraktion wird als Gesteinsfüller bezeichnet [16] [4]. Zur Herstellung der Baustoffe muss dieser Gesteinsfülleranteil allerdings auf einen bestimmten, in Normen und Verordnungen festgelegten, Bereich reduziert werden. Für die Asphaltherstellung liegt dieser Bereich beispielsweise zwischen 5 % und 10 % [9]. Wird dieser Bereich unterschritten, kann es zum Asphaltbluten und zur Spurrillenbildung kommen – wird dieser Bereich überschritten, ist ein überharter, zerbrechlicher und rissanfälliger Asphalt die Folge [2] [3].

Eine Reduzierung des Gesteinsfülleranteils ist unabdingbar, um den Anforderungen an die Produktqualitäten nachzukommen. Diese erfolgt gemäß dem Stand der Technik mittels Aero-, Hydro- und Sieb- Klassierern. Diese Klassierverfahren weisen in der Regel eine hohe und komplexe Bauweise auf und bedingen aufwendige Genehmigungsverfahren. Eine unkomplizierte Integration dieser Verfahren in bestehende Aufbereitungs- oder Förderprozesse ist nicht möglich. Eine solche ist allerdings erforderlich, um eines der Probleme der Betriebe der Steine- und Erden- Industrie zu lösen. Diese verfügen oftmals nicht über die notwendigen Klassierkapazitäten, um mit ihrer gesamten Produktion den Qualitätsanforderungen, welche sich in den letzten Jahrzehnten zunehmend verschärft haben, nachzukommen. Infolge ist eine Klassierung sämtlicher Gesteinskörnungen nicht möglich und ein Teil dieser Körnungen wird auf Halden deponiert und kann der Wirtschaft nicht zugeführt werden.

Zur Lösung dieser Problematik ist ein niedrigbauendes auf dem Fluid Luft basierendes Verfahren erforderlich, welches eine unkomplizierte Installation in bestehende Förder- und Aufbereitungsprozesse, z. B. an Bandübergabestationen, ermöglicht. Dies soll die Notwendigkeit vorgeschalteter Lagerprozesse und die Komplexität von Genehmigungsverfahren vermeiden. Des Weiteren muss das Verfahren energieeffizient sein und die für den Verwendungszweck erforderliche Trennschärfe aufweisen. Ein solches Verfahren ist in [10] skizziert worden. Diese Arbeit prüft die technisch-wirtschaftliche Plausibilität dieses neuentwickelten Verfahrens und stellt die Funktionsweise und die

Dimensionierung des Verfahrens anhand von analytischen und labortechnischen Methoden vor.

Hierzu stellt diese Arbeit zunächst die Funktionsweise des Verfahrens anhand seiner vier Hauptkomponenten vor, beschreibt die Zusammenhänge zwischen den auftretenden Parametern und validiert diese anhand von Laboruntersuchungen. Diese als Gleichungen formulierten Zusammenhänge ermöglichen eine Dimensionierung der Anlage. Die Funktionsweise der als Schlagleisten-Querstromsichter bezeichneten Neuentwicklung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Zu Beginn des Klassierprozesses wird das Klassiergut über die Aufgabeeinheit in den Klassierer eingeführt. Das Aufgabegut lässt sich dabei über den Durchsatz, die Schüttdichte sowie über das Kornspektrum beschreiben. Die Aufgabeeinheit hat die Funktion, das Aufgabegut, welches über eine Bandanlage transportiert wird, kontinuierlich, gleichmäßig und räumlich gezielt in den Dispergierraum aufzugeben. Die Partikel sollten dabei optimaler Weise direkt über der Drehachse der Dispergiereinheit in den Dispergierraum fallen und dabei so geringe horizontale Geschwindigkeiten wie möglich aufweisen. Die Breite des Klassierers und all seiner Komponenten ist dabei an der Breite der Bandanlage auszurichten.

Im Dispergierraum fällt das Aufgabegut herab, bis es in den Wirkungsbereich der Dispergiereinheit eintritt. Dieser befindet sich in einer Entfernung zur Materialaufgabe, die ca. einem Drittel der Länge der Schlagleisten entspricht. Im Dispergierraum wird das Partikelkollektiv von rotierenden Schlagleisten erfasst und dispergiert. Im Zuge der Dispergierung reichert sich das Feingut in der Luftströmung an, während das Grobgut durch den Impuls in den Strömungskanal geworfen wird. In Abhängigkeit der Anzahl, Länge und Drehzahl der Schlagleisten lässt sich die maximale Falltiefe der Partikel im Dispergierraum bestimmen. Sämtliche Partikel werden zwischen dieser Falltiefe und dem Eintrittspunkt in den Wirkungsbereich von den Schlagleisten erfasst. In diesem Bereich lässt sich für jeden Punkt die Partikelgeschwindigkeit infolge des Impulses berechnen. Um die Partikel effektiv zu erfassen, ist eine gewisse Drehzahl der Dispergiereinheit erforderlich. Diese lässt sich in Abhängigkeit der Fallgeschwindigkeit und der gewünschten maximal zulässigen Falltiefe bestimmen. Im Gegensatz zum Grobgut reichert sich das Feingut infolge der Dispergierung in der Luftströmung an und wird mit

dieser transportiert. Die Dispergiereinheit ist einer der zwei wesentlichen Strömungserzeuger des Klassierers. Die erzeugte Strömung lässt sich auf Basis der Drehzahl, Anzahl und Länge der Schlagleisten berechnen. Die Luft wird, wie bei einem Radiallüfter, axial eingesaugt und in den Strömungskanal geblasen. Dies geschieht über Luftlöcher an den Seiten der Dispergiereinheit. Die Laboruntersuchungen haben ergeben, dass die Strömungsberechnungen um einen Korrekturfaktor angepasst werden müssen. Der Energieverbrauch der Dispergiereinheit lässt sich anhand der theoretischen Annahmen sowohl für die Strömungserzeugung als auch für das Werfen der Partikel genau berechnen.

Im Strömungskanal kommt es zu einer Fraktionierung des Grobguts entlang der Länge des Kanals. Dabei werden die geworfenen Partikel von korngößenabhängigen Widerstandskräften abgebremst. Diese Widerstandskräfte verdoppeln sich bei jeder Halbierung der Korngröße. Die jeweiligen Wurfbahnen der Partikel lassen sich anhand ihrer Position und Geschwindigkeit nach der Kollision mit den Schlagleisten berechnen und simulieren. Da die Partikel an unterschiedlichen Positionen von den Schlagleisten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfasst werden, weisen diese auch unterschiedliche Wurfbahnen auf. Generell gilt dabei, dass feine Partikel ähnliche Wurfweiten aufweisen, wohingegen grobe Körnungen über einen größeren Bereich geworfen werden. Eine eindeutige Trennung gröberer Fraktionen ist über den Wurfmechanismus nicht ohne weiteres zu realisieren. Im Gegensatz zum Grobgut wird das Feingut im Strömungskanal mit der Fluidströmung zum Feingutaustrag befördert. Diese Strömung gelangt durch eine Öffnung von der Dispergiereinheit in den Strömungskanal. Der wesentliche Parameter im Strömungskanal ist die Gutbeladung. Diese ist der Quotient aus dem Durchsatz und dem effektiven Volumenstrom im Strömungskanal, welcher maßgeblich durch die Dispergiereinheit erzeugt wird. Die zulässige Gutbeladung gibt den maximal möglichen Durchsatz bei einer bestimmten Strömung an. Diese kann sich bei verschiedenen Sichtertypen stark unterscheiden.

Um die Strömung und das Feingut zum Feingutabscheider zu transportieren, wird eine Absauge-Einheit verwendet, welche aus einem externen Lüfter besteht, der die Öffnung im Strömungskanal mit einem Feingutabscheider verbindet und eine Strömung erzeugt. Die Öffnung des Absauge-Kanals befindet sich am oberen hinteren Ende des Strömungskanals und liegt quer zu diesem. Durch diese Anordnung entsteht ein hoher Strömungswiderstand. Die Strömung, die durch den Absauge-Lüfter erzeugt wird,

dient dabei hauptsächlich dazu, den Druckverlust, der mit diesen Strömungswiderstand einhergeht, auszugleichen. In diesem Fall muss die Absauge-Strömung, der Strömung, die durch die Dispergiereinheit erzeugt wird, entsprechen. Diese Anordnung bietet allerdings auch einen Vorteil. Dieser besteht darin, dass sich durch die Absauge-Strömung eine Trennzone bilden lässt, in welcher die Strömungsgeschwindigkeit der kritischen Sinkgeschwindigkeit des Trennkorns entspricht. Dadurch kann gewährleistet werden, dass gröbere Körnungen aus dem Fluid herausfallen und über den Grobgutaustrag ausgetragen werden.

Aus der Beschreibung der Funktionsweise lassen sich zwei Gleichungen ableiten, anhand welcher eine Anlagendimensionierung möglich ist. Die erste Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen der Gutbeladung $\%_G$, dem Durchsatz \dot{M} und der effektiven Strömung \dot{V}_{ef} , welche sich aus den Dimensionen des Klassierers ableiten lässt:

$$\frac{\dot{M}}{\%_G} = \dot{V}_{ef} = b \pi L_D \frac{F_{DS}}{2 F_{krit}} \left(\sqrt{v_A^2 + \frac{2}{3} g L_D} + \sqrt{v_A^2 + \left(\frac{2}{3} + 4 F_{krit} \right) g L_D} \right) \quad (82)$$

Die entscheidende Dimension ist dabei die Länge der Schlagleisten L_D . In Abhängigkeit zu dieser lassen sich die Höhe und Länge des Klassierers abschätzen, wohingegen die Breite b von der Bandanlage abhängt. Die weiteren in der Gleichung beinhalteten Parameter beziehen sich auf labortechnisch bestimmte Korrekturfaktoren und die Partikelgeschwindigkeit nach der Materialaufgabe v_A . Ebenso lässt sich der Energieverbrauch P in Abhängigkeit zum Durchsatz und zur notwendigen Strömung abschätzen:

$$P \approx \frac{2 (\pi n L_D)^2}{\eta} \left(4 \pi \zeta \rho_f n b L_D^2 F_{DS}^3 + \dot{M} \right) \quad (83)$$

Wobei n die Drehzahl der Dispergiereinheit, η der Wirkungsgrad, ζ der Strömungswiderstandsbeiwert, ρ_f die Fluidichte und F_{DS} ein Korrekturfaktor ist.

Um diese Gleichungen anzuwenden zu können, ist die zulässige Gutbeladung des Klassierers im Labor bestimmt worden. Diese liegt bei ca. 10 kg/m³. Neben der Bestimmung der zulässigen Gutbeladung ist ebenfalls der Einfluss verschiedener Parameter auf die Trennschärfe untersucht worden.

Die Untersuchungen zeigen auf, dass der Füllergehalt mit der Laboranlage nicht unter ca. 4 % reduziert werden kann. Diese Begrenzung des Verfahrens ist durch eine Versuchsreihe validiert worden, bei welcher mehrere Klassierversuche in Reihe geschaltet worden sind. Dies bedeutet, dass das zum Teil entfüllerte Grobgut aus dem vorherigen Versuch erneut klassiert worden ist. Unabhängig vom Massenstrom des Klassierguts lässt sich bei allen Testreihen dieselbe Begrenzung feststellen. Aus den weiteren Untersuchungen lassen sich zwei Gründe für diese Begrenzung ableiten. Der erste Grund ist die unzureichende Dimensionierung der Absauge-Strömung der Laboranlage. Diese ist auf $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ begrenzt gewesen, was einer Strömung durch die Dispergieinheit bei einer Drehzahl von ca. 13,4 Umdrehungen pro Sekunde entspricht. Wird die Drehzahl erhöht, reicht die Absauge-Strömung nicht aus, um das Feingut-Luft-Fluid abzusaugen und die Trennschärfe nimmt ab. Bei einer höheren Absauge-Strömung lässt sich eine höhere Trennschärfe erwarten. Der zweite Grund liegt in einer unzureichenden Länge des Strömungskanals. Die Länge des Strömungskanals gibt die Größe des Klassierraums an, welche sich auf die Trennschärfe auswirkt. Die Untersuchungen weisen eine lineare Zunahme der Trennschärfe bei einer Erhöhung der Länge des Klassierraums nach. Allerdings reicht die Länge der Laboranlage nicht aus, um die optimale Länge des Klassierraums zu bestimmen. Ein wesentliches Optimierungspotenzial der Laboranlage geht allerdings aus der Reduzierung von Strömungswiderständen hervor. Hierzu sollten u. a. ein vereinfachter Lufteinzug, ein glattes Wandprofil des Strömungskanals und eine vergrößerte Absauge-Leitung eingesetzt werden.

Trotz dieser Optimierungen ist eine Reduzierung des Gesteinsfülleranteils mit diesem Verfahren auf annähernd 0 % nicht möglich. Dies liegt daran, dass sich ein Teil der Körnungen, vorwiegend das Feingut, infolge der Dispergierung in der Strömung anreichert, wohingegen der andere Teil durch die Schlagleisten geworfen wird. Infolge des Werfens wirken korngößenabhängige Strömungswiderstandskräfte, die die Wurfgeschwindigkeit der Partikel abbremsen. Diese Kräfte wirken in Relation zur Differenz zwischen der Geschwindigkeit der geworfenen Partikel und der Strömungsgeschwindigkeit und verdoppeln sich bei jeder Halbierung der Korngröße. D. h., Teile des Feinguts, welche eigentlich zum hinteren Ende des Strömungskanals befördert werden sollen, lagern sich infolge der Widerstandskräfte im vorderen Teil des Strömungskanals ab. Dieser Mechanismus kann nicht verhindert werden, allerdings könnte aber ein

zweiter Feingutaustrag am vorderen Ende des Strömungskanals zum Einsatz kommen.

Für den geforderten Verwendungszweck, der Entfüllung von Gesteinskörnungen zur Asphaltherstellung, wird eine Reduzierung des Gesteinsfülleranteils auf 5 % bis 10 % gefordert. Mit einer Reduzierung auf ca. 4 % bis 5 % kommt die Neuentwicklung diesen Anforderungen nach und lässt sich mit dem Stand der Technik vergleichen, bei welchem eine Reduzierung des Gesteinsfülleranteils auf 2 % bis 4 % angestrebt ist. Dabei weist die Neuentwicklung einen vergleichsweise geringen Fehlkornanteil, welcher im Mittel bei 0,3 % liegt, auf. Die technische Plausibilität des Verfahrens und die Funktionalität nach dem gewünschten Verwendungszweck lassen sich folglich bestätigen.

Die technisch-wirtschaftliche Bewertung des Verfahrens ist durch einen quantitativen Vergleich mit dem Stand der Technik erfolgt. Hierzu sind die Anlagendaten von über 300 Klassierern ausgewertet worden. Diese Auswertung ermöglicht den Vergleich der Bauhöhe und des Energieverbrauchs mit dem jeweiligen Durchsatz der Klassierer. Durch die Bestimmung der zulässigen Gutbeladung der Neuentwicklung lassen sich, aufbauend auf die Gleichungen zur Dimensionierung des Verfahrens, Kennlinien ableiten, die die Bauhöhe bzw. den Energieverbrauch in Relation zum Durchsatz darstellen. Diese Kennlinien sind mit den Daten aus dem Stand der Technik verglichen worden. Dieser Vergleich weist der Neuentwicklung sowohl eine deutlich geringere Bauhöhe im Vergleich zu den meisten anderen Klassierverfahren als auch einen geringen Energiebedarf nach. Lediglich einige Hydroklassierer und Siebanlagen arbeiten platzsparender oder energieeffizienter. Allerdings können der Platzbedarf und der Energiebedarf der Neuentwicklung durch eine Optimierung der Strömungsverhältnisse erheblich reduziert werden. Der quantitative Vergleich weist eine technisch-wirtschaftliche Eignung des Verfahrens und eine Skalierbarkeit bei optimierter Dimensionierung nach.

Allerdings muss hierbei ein weiterer Nachteil berücksichtigt werden: Durch die hohen mechanischen Beanspruchungen während der Dispergierung kommt es zwangsläufig zu einem Verschleiß der Schlagleisten. Diese müssen folglich regelmäßig ausgetauscht werden. Dieser Wartungsaufwand sollte sich allerdings durch eine wartungsfreundliche Konzeptionierung der Dispergiereinheit reduzieren lassen. Dennoch sind

Untersuchungen notwendig, um den Einfluss des Verschleißes auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens bestimmen zu können. Ebenfalls kann es durch den Prallmechanismus zu einer Zerkleinerung der Partikel kommen. Basierend auf den Berechnungen und einer Literaturrecherche wird diese Zerkleinerung bis zu einem Durchsatz von 100 t/h unter optimierten Strömungsbedingungen als nicht wesentlich eingeschätzt. Dennoch ist eine genaue Analyse dieses Zerkleinerungsmechanismus für einen Industrie-Einsatz erforderlich.

Basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit lässt sich eine Eignung des Verfahrens für einen Einsatz in der Steine- und Erden- Industrie aufzeigen. Jedoch Tests unter Industrie- Bedingungen und den hier notwendigen Dimensionierungen notwendig, welche die in dieser Arbeit aufgezeigten Optimierungsansätze aufgreifen sollten. Einige dieser Optimierungsansätze werden im folgenden Kapitel, dem Ausblick, gemäß folgender Übersicht der Optimierungen und Interdependenzen aufgegriffen:

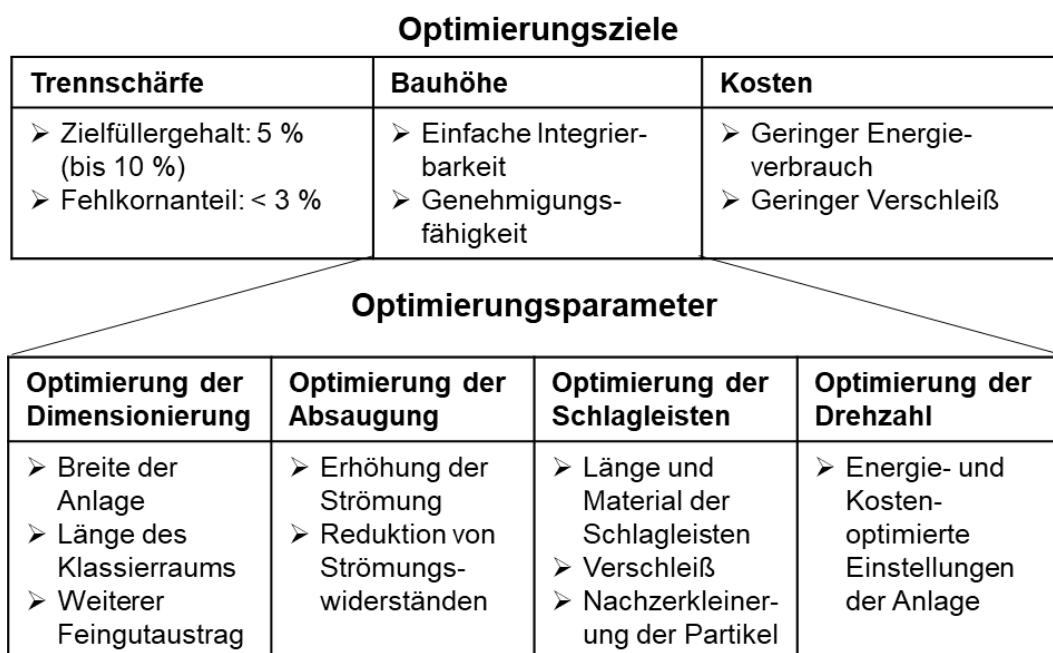


Abbildung 56: Optimierungsziele und –Parameter

9 Ausblick

Diese Dissertation weist die technisch-wirtschaftliche Eignung eines neuentwickelten Verfahrens zur Entfüllung von Gesteinskörnungen nach. Sie stellt dabei Optimierungsansätze vor, anhand welcher das Verfahren eine Industriereife erhalten kann. Um die in dieser Dissertation getätigten Annahmen zu überprüfen und das Verfahren weiter zu optimieren, sind Untersuchungen unter Industriebedingungen erforderlich. Dieser Ausblick stellt diese Optimierungen und Untersuchungen vor. Als Optimierungsparameter sind insbesondere eine Reduzierung der Strömungswiderstände, eine Vergrößerung des Klassierraums und eine Erhöhung der Absauge-Strömung bei angepasster Erhöhung der Drehzahl festgestellt worden.

Die Strömungswiderstände sollten durch eine Optimierung des Lufteinzugs der Dispergiereinheit, durch eine Vergrößerung der seitlich angeordneten Luftlöcher bzw. durch einen achsennahen, ringförmigen Lufteinzug, durch eine Änderung des Innenprofils des Strömungskanals, welches keine Querstreben aufweisen darf, und durch eine Erhöhung des Durchmessers der Absauge-Leitungen erfolgen. Ebenfalls sollte die Kanalkrümmung am Ende des Strömungskanals so angepasst werden, sodass der Rundungswinkel 90° nicht übersteigt und die Strömung so besser geleitet werden kann. Durch eine Verringerung der Strömungswiderstände kann die Energieeffizienz zur Strömungserzeugung erhöht und die notwendige Baugröße des Klassierers, insbesondere die Länge der rotierenden Schlagleisten der Dispergiereinheit, reduziert werden.

Die Größe des Klassierraums beeinflusst die zulässige Gutbeladung jedes Klassierers. Prinzipiell gilt dabei, dass die zulässige Gutbeladung mit der Größe des Klassierraums zunimmt. Dem steht allerdings eine Erhöhung der Baugröße und eine Erhöhung der Strömungswiderstände gegenüber. Die Laboruntersuchungen an der Testanlage indizieren eine Erhöhung der Trennschärfe bei einer größeren Länge des Klassierraums. Eine optimale Länge des Klassierraums konnte im Laborumfeld nicht bestimmt werden. Dies sollte im Rahmen weiterer Untersuchungen an größer dimensionierten Anlagen erfolgen.

Die Strömung der Absauge-Einheit stellt den wesentlichen Faktor dar, welcher den möglichen Durchsatz der Laboranlage limitiert, da dieser Faktor die Strömung im Klas-

sierraum begrenzt. Die Absauge-Strömung kann durch die Verwendung eines stärkeren Lüfters und durch die Reduzierung der Strömungswiderstände, welche von Leitungen und dem Feingutabscheider ausgehen, erhöht werden. Durch eine höhere effektive Strömung im Klassierraum kann die Gutbeladung reduziert werden. So lassen sich höhere Durchsätze ohne eine Vergrößerung des Klassierers realisieren. Allerdings müssen bei einer Erhöhung der Strömung ohne eine Vergrößerung des Klassierers sowohl der erhöhte Energieverbrauch als auch der Einfluss der Baugröße auf die zulässige Gutbeladung berücksichtigt werden. Ebenso ist eine Analyse der Verschleißanfälligkeit des Absaugelüfters durchzuführen und ein Entstaubungs- bzw. Staubabscheidungskonzept zur berücksichtigen.

Die Untersuchung dieser Optimierungsansätze sollten durch weitere Testreihen ergänzt werden, welche zum einen den Einfluss höherer Füllergehalte im Klassiergut auf die Trennschärfe untersuchen und zum anderen den Einfluss der Feuchtigkeit des Klassierguts auf die Trennschärfe bestimmen. Ebenso muss die Verschleißanfälligkeit der Schlagleisten und eine möglichere Zerkleinerung der Partikel durch den Prallmechanismus untersucht werden. Diese beiden Aspekte spielen eine wesentliche Rolle für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen sollte eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Verfahrens erfolgen. Diese sollte den Energieverbrauch, die Wartungs- und Verschleißteilkosten sowie die Installations- und Materialkosten berücksichtigen. Ebenfalls muss geprüft werden, inwiefern und mit welchen Kosten sich das Verfahren in die Peripherie (z. B. Entstaubungsanlagen) integrieren lässt. Sollte sich das Verfahren sowohl wirtschaftlich als auch funktionell bewähren, so steht einem Einsatz in der Steine- und Erden- Industrie nichts im Wege. Ebenfalls können Variationen, welche die Fraktionierung des Grobguts infolge der Strömungswiderstände zum Klassieren mehrerer Trennschnitte ausnutzen, entwickelt und getestet werden, und das Funktionsprinzip kann auf andere Anwendungsbereiche wie z. B. die Pharmazie oder die Lebensmitteltechnik übertragen werden. Ebenfalls ist ein Einsatz im Recycling von Baureststoffen denkbar.

In jedem Fall ermöglicht die Entwicklung einer niedrigbauenden, energieeffizienten Anlage die Nachrüstbarkeit verschiedener Betriebe der Steine- und Erden- Industrie. Durch eine Nachrüstung solcher Aufbereitungsanlagen können Halden rückgebaut

und aufbereitet werden. So kann das Verfahren einen Beitrag zur Rohstoffeffizienz der Steine- und Erden- Industrie leisten.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Manning, „Exploitation and Use of Quarry Fines, Report No. 087/MIST2/DASM/01,“ Mineral Solutions Ltd., Manchester, 2004.
- [2] A. C. d. Vale, A. L. Faxina und F. L. G. Grecco, „Effects of filler/bitumen ratio and bitumen grade on rutting and fatigue characteristics of bituminous mastics,“ E&E Congress, Prag, 2016.
- [3] A. Diab und M. Enieb, „Investigating influence of mineral filler at asphalt mixture and mastic scales,“ ScienceDirect, Ägypten, 2017.
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Gesteinskörnungen, Ungebundene Bauweisen, „TL Gestein-StB04 Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau,“ FGSV Verlag GmbH, Köln, 2018.
- [5] Stein-Verlag Baden-Baden GmbH, „Baustoffe Standorte Online,“ Stein-Verlag Baden-Baden GmbH, 2019.
- [6] Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V, „Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland,“ Prof. Dr.-Ing. Stoll & Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Aachen, 2016. [Online]. Available: https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Dateien/Download archiv/Rohstoffe/2016-04-07_BBS_Rohstoffstudie.pdf. [Zugriff am 16 Juli 2018].
- [7] M. Kuhar, „Rock Products (World Aggregates Market),“ 10 February 2014. [Online]. Available: <http://www.rockproducts.com>. [Zugriff am 15 January 2018].
- [8] W. Lorenz und W. Gwosdz, „Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden Teil 5 Gesteinskörnungen,“ Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2002, p. 199ff.
- [9] „Wirtschaftliche Reduzierung des Fülleranteils,“ AT Minerals, [Online]. Available: https://www.at-minerals.com/de/artikel/at_2010-

- 12_Wirtschaftliche_Reduzierung_des_Fuelleranteils_1034850.html. [Zugriff am 09 November 2019].
- [10] H. Tudeshki, „Windsichtung und Windsichter“. Deutschland Patent DE 10 2018 115 480 A1, 2018.
- [11] C. V. K. P. A. T. H. Weigel, „Online quality control of aggregates based on the measurement of magnetic susceptibility,“ in *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019*, Sankt-Petersburg, CRC Press, 2020, pp. 307-315.
- [12] W. H. Langer, L. J. Drew und J. S. Sachs, „Aggregates and the environment,“ Alexandria, Virginia, Alexandria, Virginia, 2004, p. 7ff.
- [13] www.meiselrockproducts.com, „Meisel Rock Products,“ What is Aggregate Rock, 2015. [Online]. Available: <http://www.meiselrockproducts.com/what-is-aggregate-rock/>. [Zugriff am 25 March 2018].
- [14] UEPG European Aggregates Association, „UEPPG Annual Review 2017 - 2018,“ 2018. [Online]. Available: www.uepg.eu/uploads/Modules/Publications/uepg-annual-review-2017-2018.pdf. [Zugriff am 04 Januar 2020].
- [15] Beton_Wiki, „Füller,“ [Online]. Available: <https://www.beton.wiki/index.php?title=F%C3%BCller>. [Zugriff am 03 Januar 2020].
- [16] Scheuch GmbH, „Kaskadensichter für die wirtschaftliche Reduzierung des Fülleranteils,“ *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Heft 6*, pp. 289-290, 2010.
- [17] BfGA – Beratungsgesellschaft für Arbeits- und Gesundheitsschutz, „Arbeitsschutz: Mineralische Stäube,“ BfGA – Beratungsgesellschaft für Arbeits- und Gesundheitsschutz, [Online]. Available: <https://www.bfga.de/infothek/bfga-newsletter-arbeitsschutz/mineralische-staeube/>. [Zugriff am 04 November 2019].

- [18] C. Geisenhanslüke, „Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen,“ *Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau*, pp. 5-9, April 2009.
- [19] C. Sangiorgi, P. Tataranni, F. Mazzotta, A. Simone, V. Vignali und C. Lantieri, „Alternative Fillers for the Production of Bituminous Mixtures: A Screening Investigation on Waste Powders,“ MDPI, University of Bologna, 2017.
- [20] „Baustoffe und Baustoffgemische: Asphalt,“ Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., 03 November 2019. [Online]. Available: <https://www.asphalt.de/themen/technik/6-baustoffe-und-baustoffgemische/>.
- [21] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Europäische Norm EN 13043:2001*, Beuth Verlag GmbH, 2001.
- [22] Arbeitsgruppe Gesteinskörnungen, Ungebundene Bauweisen, „TL Gestein-StB,“ in *Umweltrelevante Merkmale*, FGSV, 2004, p. 23.
- [23] H. Schubert, „Aufbereitung fester mechanischer Rohstoffe Band 1,“ in *Aufbereitung fester mechanischer Rohstoffe*, Berlin, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1988, p. 255ff.
- [24] N. Hartung, Seminararbeit: Analyse von Entstaubungsanlagen zur Aufbereitung in der Steine- und Erden-Industrie, Clausthal: TU Clausthal, 2019.
- [25] P. Böhringer und K. Höffl, *Baustoffe Wiederaufbereiten und Verwerten*, Unterhaching: AVS-Institut GmbH -Verlag, 1995.
- [26] Haver & Böcker OHG, „Haver & Böcker FINE-LINE Siebmaschine,“ Haver & Böcker OHG, Münster.
- [27] Binder+Co., „Effizient Sieben,“ Binder+Co., 2019.
- [28] CAB Group, „Sandaufbereitung,“ CAB Group, [Online]. Available: <https://www.cab-group.com/anwendungen/sandaufbereitung-cabrex/>. [Zugriff am 17 November 2019].

- [29] J. Prüwasser, „Waschen - Entwässern - Entfüllern im SBM-Ortner Disc Separator mit geringstem Energie- und Wasserbedarf,“ *Aufbereitungs-Technik*, pp. 25-27, 1999.
- [30] AT Minerals, „Waschmaschine für Bruchsand,“ AT Minerals, [Online]. Available: https://www.at-minerals.com/de/artikel/at_Waschmaschine_fuer_Bruchsand_2409130.html. [Zugriff am 15 Oktober 2019].
- [31] Rippert Anlagentechnik GmbH & Co. KG, „Enststaubungsanlagen: Zyklon,“ Rippert Anlagentechnik GmbH & Co. KG, [Online]. Available: <https://www.rippert.de/entstaubungsanlagen/zyklon/>. [Zugriff am 18 November 2019].
- [32] H. Dogan, *Masterarbeit: Untersuchungen zur Optimierung eines neuentwickelten Verfahrens zur Trennung vom Fülleranteil aus trockenen Industriesanden*, Clausthal: Technische Universität Clausthal, 2016.
- [33] K. Leschonski, Die Technik des Windsichtens in Technik in: Technik der Gas-Feststoffströmung - Sichten, Abscheiden, Fördern, Wirbelschichten, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986.
- [34] ETM GmbH, „Enstaubungsanlagen,“ ETM GmbH, [Online]. Available: <https://www.envirgy.de/entstaubungsanlagen/>. [Zugriff am 14 November 2019].
- [35] H. Tudescki und C. Weigel, „Sandentfüllung direkt an der Bandübergabe: entwicklung eines Siebters,“ in *Mining 2018 / Clausthaler Kongress für Bergbau und Rohstoffe*, Clausthal-Zellerfeld, Clausthaler Hochschulbibliographie, 2018, pp. 11-16.
- [36] CMP AG, „Funktionsprinzip des CEMAG Hochleistungs-Querstromsiebters,“ CMP AG.
- [37] K. Höfl, „Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen,“ Berlin, Springer, 1986, p. 338ff.

- [38] IKW Industrieanlagenbau GmbH, „Ans Feingemachte,“ *Steinbruch und Sandgrube*, pp. 26-28, August 2011.
- [39] H. Schubert und e. al., „Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik,“ Bd. 2, Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003, pp. 101-139.
- [40] M. Stieß, „Mechanische Verfahrenstechnikpartikeltechnologie,“ Heidelberg, Springer-Verlag Berlin, 2009, pp. 261-239.
- [41] Aufbereitungstechnologie NOLL GmbH, „Windsichter: Separano-SE,“ Aufbereitungstechnologie NOLL GmbH, [Online]. Available: <https://www.noll.eu/sichter/separano-se/>. [Zugriff am 10 Februar 2020].
- [42] N. Hartung, Technisch- wirtschaftliche Bewertung von Klassieranlagen im Bergbau, Clausthal: TU-Clausthal, 2020.
- [43] C. Weigel, P. Kumar und H. Tudeszki, „Development of an air classifier for the classification of crushed aggregates,“ in *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019*, Sankt-Petersburg, St. Petersburg Mining University, 2019, pp. 115-123.
- [44] Schön, „Gesteinsdichte,“ Petrophysik, Akademie-Verlag, Berlin, 1983. [Online]. Available: <http://www.oerrheingraben.de/Geophysik/Dichte.htm>. [Zugriff am 08 Juni 2018].
- [45] J. Wessel, „Verfahren des Siebens und des Windsichtens,“ in *Grundlagen der Landtechnik Band 1*, München, 1968, pp. 151 - 157.
- [46] C. Streicher, „Beitrag zur Optimierung von Querstrom-Drehkorbsichtern,“ November 2013. [Online]. Available: <https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/2533013/AC11316878n01.pdf>. [Zugriff am 27 März 2020].
- [47] M. Stieß, „Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1,“ Springer, 2009, pp. 105-160.

- [48] thyssenkrupp, „Der richtige Prallbrecher,“ baunetzwerk.biz, [Online]. Available: <https://www.baunetzwerk.biz/der-richtige-prallbrecher/150/1990/110468>. [Zugriff am 11 Oktober 2020].
- [49] T. Wegner, „Prallzerkleinerung grober Einzelpartikel als Auslegungsgrundlage für Rotorprallbrecher,“ Freiberg, Technische Universität Freiberg, 2005, pp. 65-68.
- [50] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008,“ Beuth Verlag GmbH, 2008.
- [51] study.com, „Buoyancy Force,“ [Online]. Available: <http://study.com/academy/lesson/buoyancy-calculating-force-and-density-with-archimedes-principle.html>. [Zugriff am 01 June 2016].
- [52] Spektrum, „Stokessches Reibungsgesetz,“ [Online]. Available: <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/stokessches-reibungsgesetz/13909>. [Zugriff am 1 June 2016].
- [53] Uni Magdeburg: Institut für Strömungsmechanik und Thermodynamik, „Dynamische Viskosität von Luft,“ Uni Magdeburg, [Online]. Available: <http://www.uni-magdeburg.de/isut/LSS/Lehre/Arbeitsheft/IV.pdf>. [Zugriff am 08 Juli 2018].
- [54] Hosokawa Alpine AG, „Luftstrahlsieb und Laborgeräte,“ Hosokawa Alpine AG, [Online]. Available: <https://www.hosokawa-alpine.de/mechanische-verfahrenstechnik/maschinen/luftstrahlsieb-und-laborgeraete/luftstrahlsieb-e200-ls/>. [Zugriff am 20 Februar 2020].
- [55] Testo, „Datenblatt; Thermisches Anemometer,“ [Online]. Available: <https://static-int.testo.com/media/ca/aa/29eab72b231b/testo-425-Datenblatt.pdf>. [Zugriff am 20 Februar 2020].
- [56] H. Schubert, Aufbereitung fester mechanischer Rohstoffe, Berlin: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustire Leipzig, 1988.

- [57] R. Mulley, *Flow of Industrial Fluids: Theory and Equations*, CRC Press, 2004.
- [58] „TRGS 900 Arbeitsplatzgrenzwerte,“ Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, [Online]. Available: <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/TRGS-900.html> . [Zugriff am 27 November 2019].
- [59] „Spurrinne,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Spurrinne>. [Zugriff am 25 November 2019].
- [60] C. Schaper, „Entfüllerungsanlage und Verfahren zur Entfüllerung mit regelbarer Materialbettstärke“. Deutschland Patent EP2347833B1, 27 Mai 2015.
- [61] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Europäische Norm EN 13043:2001*, Beuth Verlag GmbH, 2002.
- [62] P. Höhl, *Untersuchungen von Gesteinsfüller zur Herstellung von Leichtbaustoffen*, Clausthal, 2020.
- [63] D. Bosold und R. Pickhardt, „Zement-Merkblatt Betontechnik B1,“ InformationsZentrum Beton GmbH, Erkrath, 2017.
- [64] H. Gschaider, „Innovative Entfüllerung zur Qualitätssteigerung von Brechsanden,“ *Advanced Mining Solutions*, pp. 49-50, 2013.
- [65] I. Setter und N. Soroka, „The Effect of Fillers on the Strength of Rock Mortars,“ Haifa, Israel, 1977.
- [66] Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., „Asphaltherstellung,“ Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., 03 November 2019. [Online]. Available: <https://www.asphalt.de/themen/qualitaet/ii-organisieren-der-qualitaet/5-asphalt-herstellen-und-liefern/>.
- [67] Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, „Grundlagen zu mineralischen Stäuben,“ Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, [Online]. Available: <https://www.bgrci.de/praxishandbuch->

baustoffindustrie/a-grundlagen/a-1-allgemeines/a-17-mineralische-staeube/.

[Zugriff am 12 Februar 2020].

- [68] Baunetz_Wissen, „Zusammensetzung von Beton,“ Heinze GmbH, [Online]. Available:

<https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/herstellung/zusammensetzung-von-beton-150914>. [Zugriff am 12 Januar 2020].

- [69] Deutsche Zement- und Betonindustrie, „Was ist Beton,“ www.beton.org, [Online]. Available: <https://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/was-ist-beton/>. [Zugriff am 12 Januar 2020].

- [70] Donaldson Filtration Solutions, „Entstaubung für die Zementbranche: Übersicht,“ Donaldson Filtration Solutions, [Online]. Available: <https://www.donaldson.com/de-de/industrial-dust-fume-mist/industries/mining-mineral-processing/#>. [Zugriff am 4 April 2020].

- [71] ETM GmbH, „Elektrofilter Entstaubungsanlagen,“ ETM GmbH, [Online]. Available: <https://www.envirgy.de/deutsch/produkte/elektrofilter-entstaubungsanlagen/>. [Zugriff am 10 August 2019].

- [72] HOSOKAWA ALPINE Aktiengesellschaft, „Sichter und Windsichter: Calciplex ACP,“ [Online]. Available: <https://www.hosokawa-alpine.de/mechanische-verfahrenstechnik/maschinen/sichter-und-windsichter/calciplex-acp/>. [Zugriff am 10 Februar 2020].

- [73] HeidelbergCement, „Anforderungen an den Mehlkorngesamtgehalt,“ HeidelbergCement, [Online]. Available: <https://www.betontechnische-daten.de/de/6-3-4-anforderungen-an-den-mehlkorngehalt>. [Zugriff am 12 Januar 2020].

- [74] Intensiv-Filter, „Lexikon der Entstaubung,“ [Online]. Available: https://www.intensiv-filter.com/fileadmin/user_upload/downloads/Lexikon_der_Entstaubung_Intensiv-Filter.pdf. [Zugriff am 19 November 2019].

- [75] K. Kolmsee, M. Mattenklott, M. Götz und U. Spod, „Asbest in mineralischen Rohstoffen,“ 14 November 2019. [Online]. Available: https://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2010_003.pdf.
- [76] Mining Report Glückauf, „Wassernebel bindet Staub,“ [Online]. Available: <https://mining-report.de/blog/wassernebel-bindet-staub/>. [Zugriff am 11 November 2019].
- [77] Verein Deutscher Zementwerke e.V., „Zementherstellung,“ [Online]. Available: <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/zement/herstellung/>. [Zugriff am 12 Januar 2020].
- [78] M. S. Guimares, J. R. Valdes, A. M. Palomino und J. Santamarina, „Aggregate Production: Fines generation during rock crushing,“ *International Journal of Mineral Processing*, 16 August 2006.

Anhang 1: Aufteilung der Steine- und Erden- Produktion in Europa 1997

Die Aufteilung der Steine- und Erden- Produktion in Europa im Jahre 1997 gemäß Coope ist in Tabelle 18 dargestellt:

	Europa	Welt	Anteil der EU-Produktion
Kies und Sand	1148Mt	4000Mt	28,7%
Gebrochener Naturstein	1376,29Mt	4000Mt	34,4%
Werksteine	17Mt	36Mt	47,2%
Gips, Anhydrit	24,95Mt	100Mt	25,0%
Schiefer	0,947Mt	4Mt	23,7%
Ton	108,65Mt	400Mt	27,2%

Tabelle 18: Natursteinproduktion in Europa und weltweit nach Coope 1997 [8]

Auf Basis dieser Tabelle kann der Anteil an gebrochenen Natursteinen an der Steine- und Erden- sowie der Naturstein- Produktion abgeschätzt werden. Dieser liegt bei ca. der Hälfte der Steine- und Erden- Produktion. Sande und Kiese machen ca. 42 % der Produktion aus. Naturwerksteine und Dachschiefer tragen lediglich zur 0,6 % zur Steine- und Erden- Produktion in Europa bei [8]. Naturwerksteine und Dachschiefer machen damit ca. 1,2 % der Natursteinproduktion aus. Somit besteht die Natursteinproduktion in Europa maßgeblich, zu 98,8 %, aus natürlichen Gesteinskörnungen.

Anhang 2: Entwicklung der Natursteinproduktion in Deutschland

Der Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. stellte im Jahr 2016 in seiner Studie „Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland“ die jährliche Natursteinproduktion in Deutschland von 2000 bis 2013 dar und ermittelte für die Jahre 2020, 2025, 2030 und 2035 je eine positive und eine negative Prognose. Abbildung 57 stellt diese Produktionszahlen dar. Die Werte für 2020 bis 2035 sind die Mittelwerte aus der positiven und negativen Prognose:

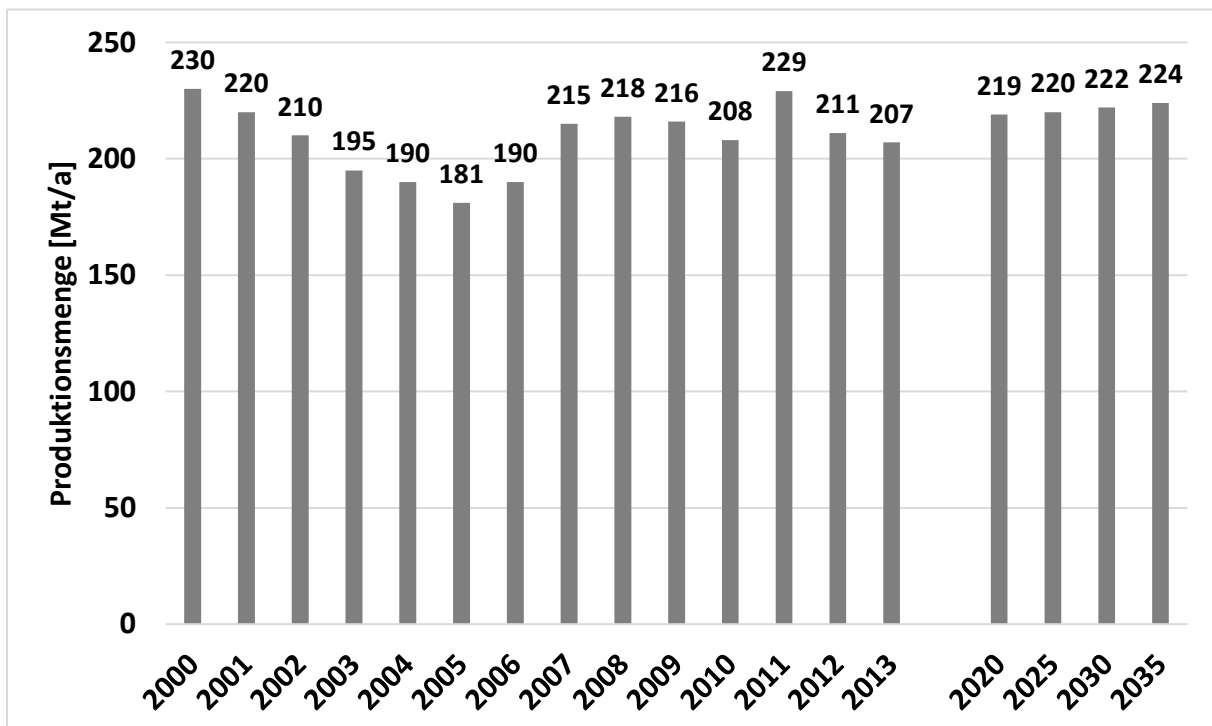


Abbildung 57: Produktionsmenge von Natursteinen [Mt] [6]

Die positive Prognose setzt eine positive gesamtwirtschaftliche Entwicklung voraus, die in gesteigerten Steuereinnahmen, höheren Investitionen durch die öffentliche Hand in die Infrastruktur und einem Verkehrswachstum resultieren. So wird ein Anstieg der Produktion auf 250 Mio. t im Jahr 2035 prognostiziert, was einem Anstieg um 20,8% bezogen auf das Jahr 2013 entspricht [6].

Bei einer mäßigen Wirtschaftsentwicklung, welche in geringen Investitionen durch die öffentliche Hand oder aus dem privaten Sektor in die Infrastruktur resultiert, wird für 2035 eine Reduktion der Natursteinproduktion um 4,4 % im Vergleich zu 2013 auf 198 Mio. t prognostiziert [6].

Anhang 3: Begriffsdefinitionen nach TL Gestein-StB04

In den *technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau TL Gestein-StB04* der *Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Gesteinskörnungen, Ungebundene Bauweisen*, werden für diese Arbeit grundlegende Begriffe bezüglich Gesteinskörnungen definiert. Diese sind im Folgenden dargestellt [4]:

„Gesteinskörnung: *Körniges Material für die Verwendung im Bauwesen. Gesteinskörnungen können natürlich, industriell hergestellt oder recycelt sein. Unterschieden wird in grobe Gesteinskörnungen, feine Gesteinskörnungen und Füller.“* [4]

„Natürliche Gesteinskörnung: *Gesteinskörnung aus mineralischen Vorkommen, die ausschließlich einer mechanischen Aufbereitung unterzogen worden sind.* „ [4]

„Kornklasse: *Bezeichnung einer Gesteinskörnung mittels unterer (d) und oberer (D) Siebgröße, ausgedrückt als d/D.“* [4]

„Grobe Gesteinskörnung: *Bezeichnung für Korngruppen gemäß Tabelle 19.“* [4]

TL Gestein-StB 04: Grobe Gesteinskörnung		
d	D	Bemerkung
$\geq 2 \text{ mm}$	$\geq 4 \text{ mm}$	Anwendungsbereich Beton (gemäß DIN EN 12620)
$\geq 2 \text{ mm}$	$\leq 4 \text{ mm}$	Anwendungsbereich Asphalt (gemäß DIN EN 13043)
$\geq 1 \text{ mm}$	$> 2 \text{ mm}$	Anwendungsbereich Schichten ohne Bindemittel, hydraulisch gebundene Schichten (gemäß DIN EN 13242)

Tabelle 19: Zusammensetzung von groben Gesteinskörnungen gemäß TL Gestein-StB 04 [4]

„Feine Gesteinskörnungen: *Bezeichnung für Korngruppen gemäß Tabelle 20.“* [4]

TL Gestein-StB 04: Feine Gesteinskörnung		
d	D	Bemerkung
-	$\leq 4 \text{ mm}$	Anwendungsbereich Beton (gemäß DIN EN 12620)
-	$\leq 2 \text{ mm}$	Anwendungsbereich Asphalt (gemäß DIN EN 13043)
0 mm	$> 2 \text{ mm}$	Anwendungsbereich Schichten ohne Bindemittel, hydraulisch gebundene Schichten (gemäß DIN EN 13242)

Tabelle 20: Zusammensetzung von feinen Gesteinskörnungen gemäß TL Gestein-StB 04 [4]

„Feinanteil: Kornklasse einer Gesteinskörnung, die durch das $63 \mu\text{m}$ Sieb hindurchgeht.“ [4]

„Füller: Gesteinskörnung, deren überwiegender Teil durch das $63 \mu\text{m}$ Sieb hindurchgeht.“ [4]

„Fremdfüller: Füller mineralischen Ursprungs, der gesondert hergestellt wurde.“ [4]

Anhang 4: Feinanteilspezifische Kategorien gemäß DIN EN 13043

In der *DIN EN 13043* wird auf verschiedene Kategorien an groben und feinen Gesteinskörnungen hingewiesen, für welche ein bestimmter Fülleranteil nicht überschritten werden darf. Für grobe Körnungen (0 bis 5 mm) liegen diese Kategorie-spezifischen Gesteinsfülleranteile bei 0,5 %, 1 %, 2 %, 4 % und darüber. Feine Körnungen können höhere Gesteinsfülleranteile enthalten. Diese liegen bei 3 %, 10 %, 16 %, 22 % und darüber. Die Auflistung der Kategorien gemäß *EN13043:2001* ist in nachfolgender Tabelle (Tabelle 21) dargestellt [20]:

Kategorien zulässiger Fülleranteilen in Gesteinskörnungen für die Asphaltherstellung gemäß EN 13043:2001		
Gesteinskörnung	Siebdurchgang als Massenanteil in Prozent durch das 63-µm-Sieb	Kategorie <i>f</i>
Grob	≤ 0,5	$f_{0,5}$
	≤ 1	f_1
	≤ 2	f_2
	≤ 4	f_4
	> 4	$f_{\text{angegeben}}$
Fein	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	≤ 22	f_{22}
	> 22	$f_{\text{angegeben}}$

Tabelle 21: Zulässige Kategorie-spezifische Gesteinsfülleranteile in Gesteinskörnungen gemäß EN 13043:2001 [20]

Anhang 5: Feinanteilspezifische Kategorien gemäß DIN EN 12620

In der *DIN EN 12620* wird auf verschiedene Kategorien an groben und feinen Gesteinskörnungen für die Betonherstellung hingewiesen, für welche ein bestimmter Fülleranteil nicht überschritten werden darf. Für grobe Körnungen mit einer Größe von bis zu 5 mm liegen diese Kategorie-spezifischen Gesteinsfülleranteile bei 1,5 %, 4 % und darüber. Natürliche zusammengesetzte Gesteinskörnungen mit einem Kornspektrum von 0 bis 8 mm werden nach Fülleranteilen unter 3 %, 10 %, 16 %, 22 % und darüber eingeteilt. Bei Korngemischen liegen diese Kategorie-spezifischen Gesteinsfülleranteile bei 3 %, 11 % und darüber. Feine Körnungen können höhere Gesteinsfülleranteile enthalten. Diese liegen bei 3 %, 10 %, 16 %, 22 % und darüber. Die Auflistung der Kategorien gemäß EN13043:2001 ist in nachfolgender Tabelle dargestellt [49]:

Kategorien zulässiger Fülleranteilen in Gesteinskörnungen für die Betonherstellung gemäß EN 12620:2002		
Gesteinskörnung	Siebdurchgang als Massenanteil in Prozent durch das 63-µm-Sieb	Kategorie <i>f</i>
Grobe Gesteinskörnung	$\leq 1,5$	$f_{1,5}$
	≤ 4	f_4
	> 4	$f_{\text{angegeben}}$
Natürlich zusammengesetzte Gesteinskörnung 0/8mm	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	> 16	$f_{\text{angegeben}}$
Korngemisch	≤ 3	f_3
	≤ 11	f_{11}
	> 11	$f_{\text{angegeben}}$
Feine Gesteinskörnung	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	≤ 22	f_{22}
	> 22	$f_{\text{angegeben}}$

Tabelle 22: Zulässige Kategorie-spezifische Gesteinsfülleranteile in Gesteinskörnungen gemäß EN 12620:2002 [49]

Anhang 6: Normen und Verordnungen für Asphalt, Beton und Zement

Asphalt

- DIN EN 13043 (Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen, Fassung 12/2002) [20]
- DIN EN 13108 (Asphaltemischgut – Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton, Fassung 12/2016)
- TL Gestein-StB 04 (Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Fassung 2018) [21]

Beton

- DIN EN 12620 Gesteinskörnungen für Beton [49]
- DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- DIN EN 206-1 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- ZTV Beton-StB 07

Zement

- DIN EN 197-1 Zement – Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
- DIN EN 14216 Zement – Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Sonderzement mit sehr niedriger Hydratationswärme
- DIN 1164-10 Zement mit besonderen Eigenschaften – Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt
- DIN 1164-11 Zement mit besonderen Eigenschaften – Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Zement mit verkürztem Erstarren
- DIN 1164-12 Zement mit besonderen Eigenschaften – Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Zement mit einem erhöhten Anteil an organischen Bestandteilen

Anhang 7: Partikelbewegung im Fluid

Bewegt sich ein Partikel in einem Fluid so wirken diverse Kräfte auf diesen. Diese Kräfte sind eine Strömungswiderstandskraft, die entgegengesetzt zur Strömungsrichtung wirkt, eine Feldkraft, wie z. B. die Gravitationskraft oder eine Zentrifugalkraft, sowie eine Auftriebskraft. Die Wirkrichtung dieser Kräfte ist schematisch in Abbildung 58 dargestellt. Dieser Darstellung liegt der vereinfachte Fall zugrunde, indem sich ein Partikel, ohne Einwirkung von Horizontalkräften, vertikal in einem Fluid bewegt:

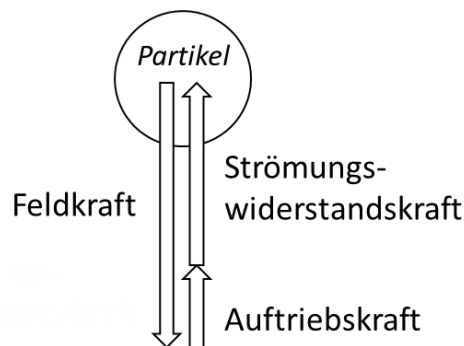


Abbildung 58: Schematische Darstellung der Kräfte bei der Partikelbewegung im Fluid [46]

Generell wirken die Strömungswiderstandskraft F_f und die Auftriebskraft F_b der Feldkraft entgegen. Das Kräftegleichgewicht stellt sich wie folgt dar:

$$F_g = F_f + F_b \quad (84)$$

Die Strömungswiderstandskraft, welche von der Geschwindigkeit (Sinkgeschwindigkeit) der Partikel sowie von der Partikeloberfläche abhängt, steigt dabei so lange an, bis diese der Differenz zwischen Feld- und Auftriebskraft entspricht und sich ein Kräftegleichgewicht einstellt. In diesem Fall wird ein Partikel nicht mehr beschleunigt und bewegt sich mit einer konstanten Sinkgeschwindigkeit w . Diese Sinkgeschwindigkeit w stellt die relative Geschwindigkeit der Teilchen bezogen auf die Geschwindigkeit des Fluids v dar. Die Geschwindigkeit der Teilchen u ist daher:

$$u = v - w \quad (85)$$

Im Folgenden werden zunächst die partikelgrößenunabhängigen Kräfte, die Feldkräfte und die Auftriebskraft näher erläutert. Anschließend wird auf die partikelgrößenabhängige Strömungswiderstandskraft und die aus dem Kräftegleichgewicht resultierende Sinkgeschwindigkeit eingegangen.

Feldkräfte und Auftriebskraft

Die Feldkräfte die in einem Windsichter auftreten können, sind, je nach Art des Sichters, entweder die Zentrifugalkraft F_z :

$$F_z = m \frac{v_U^2}{r} \quad (86)$$

oder die Gravitationskraft F_g :

$$F_g = m g \quad (87)$$

wobei g der Gravitationsbeschleunigung von ca. $9,81 \text{ m/s}^2$ entspricht, v_U die Rotationsgeschwindigkeit der Partikel während einer kreisförmigen Bewegung ist und r der Radius der Rotation ist. Die Masse der Partikel ist als m gekennzeichnet und entspricht:

$$m = \rho_p V_p \quad (88)$$

wobei ρ_p die Dichte der Partikel und V_p das Partikelvolumen ist.

Die Feldkräfte beschleunigen alle Partikel unabhängig von deren Masse bzw. der Dichte und dem Volumen in gleicher Art und Weise. Die Beschleunigung durch die Gravitationskraft erfolgt nach unten in Richtung des Erdmittelpunkts, die Beschleunigung durch eine Zentrifugalkraft erfolgt senkrecht nach außen zur Kreisbewegung eines Partikels [50] [46].

Die Auftriebskraft ist eine aufwärtsgerichtete Kraft, welche von einem Fluid auf ein eindringendes Objekt ausgeübt wird. Diese Kraft kann durch das archimedische Prinzip erklärt werden, welches besagt, dass der Quotient aus der Dichte eines festen Körpers und der Dichte der Flüssigkeit, die dieser Körper verdrängt, dem Quotienten aus dem Gewicht des festen Körpers und dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit entspricht. Die Kraft wirkt also, wenn ein Flüssigkeitsvolumen durch einen festen Körper ersetzt wird. Die Auftriebskraft F_b ist in entgegengesetzter Richtung zur Schwerkraft gerichtet und wirkt wie folgt:

$$F_b = \rho_f V_p g \quad (89)$$

Wobei ρ_f die Fluidichte, V_p das verdrängte Volumen (Partikelvolumen) und g die Gravitationsbeschleunigung ist [50] [46].

Unter Berücksichtigung der Erdanziehungskraft als Feldkraft und der Auftriebskraft, kann das Kräftegleichgewicht wie folgt beschrieben werden:

$$\frac{(\rho_p - \rho_f)}{6} \pi d_p^3 g = F_f \quad (90)$$

Strömungswiderstandskraft und Sinkgeschwindigkeit

Der Strömungswiderstand bzw. die Widerstands- oder Reibungskraft F_f eines sich in einem Fluid bewegendes Partikels, hängt von dem Widerstandsbeiwert $c_f(\text{Re}_x)$, der Reynolds-Zahl, der Partikeloberfläche A_p , der Fluidichte und der Sinkgeschwindigkeit der Partikel w ab. Dieser Zusammenhang wird durch folgende Formel beschrieben:

$$F_f = c_f(\text{Re}_x) A_p \rho_f \frac{w^2}{2} \quad (91)$$

Unter Einbeziehen der Gravitationskraft (Feldkraft) und der Auftriebskraft ergibt sich im Stoke'schen Bereich das folgende, ausformulierte Kräftegleichgewicht:

$$F_g - F_b = F_f = \frac{(\rho_p - \rho_f)}{6} \pi d^3 g = \frac{\rho_f}{8} \pi w^2 d^2 c_f(\text{Re}_x) \quad (92)$$

Aufgelöst nach der Sinkgeschwindigkeit w gestaltet sich die Gleichung im Allgemeinen wie folgt:

$$w = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho_f) g d}{3 \rho_f c_w(\text{Re}_x)}} \quad (93)$$

Wobei der Widerstandsbeiwert $c_f(\text{Re}_x)$ von der jeweiligen Reynolds-Zahl Re abhängt:

$$\text{Re} = \frac{w d}{\eta} \rho_f \quad (94)$$

Die Reynolds-Zahl Re hängt von dem Durchmesser eines Partikels d , der dynamischen Viskosität des Fluids η sowie von der Fluidichte ρ_f ab. Insgesamt werden drei Strömungsbereiche mit unterschiedlichen Reynolds-Zahlen unterscheiden [46] [22]:

- Der Stoke'sche Bereich für laminare Strömungen bei Reynolds-Zahlen kleiner 0,25.
- Ein Übergangsbereich für visko-turbulente Strömungen bei Reynolds-Zahlen zwischen 0,25 und 2000.

- Der Newton'sche Bereich für turbulente Strömungen bei Reynolds-Zahlen größer 2000.

Laminare Strömungen im Stoke'schen Bereich

Der Stoke'sche Bereich gilt für laminare Strömungen. Die zugehörige Reynolds Zahl Re ist kleiner als 0,25. Der Strömungswiderstand resultiert hauptsächlich durch Reibung. Die Widerstandskraft F_f , welche auf einen kugelförmigen Partikel wirkt, welcher sich mit einer Geschwindigkeit w bewegt, berechnet sich nach Stokes wie folgt:

$$F_f = -6 \pi r \eta w \quad (95)$$

Dabei ist r der Radius des kugelförmigen Partikels und η ist die dynamische Viskosität des Fluids. Die Widerstandskraft ist negativ, d. h., sie wirkt entgegen der Bewegungsrichtung des Partikels bzw. der Partikelgeschwindigkeit [51]. Im Allgemeinen kann der Widerstandsfaktor c_w im Stoke'schen Bereich wie folgt vereinfacht werden:

$$c_w = \frac{24}{Re} \quad (96)$$

Unter Einbeziehen des Kräftegleichgewichts, des Widerstandsbeiwerts und der Reynolds-Zahl errechnet sich die Sinkgeschwindigkeit im Stoke'schen Bereich wie folgt:

$$w = \frac{(\rho_p - \rho_f)}{18 \eta} g d^2 \quad (97)$$

Mit diesen Gleichungen ist es möglich die Sinkgeschwindigkeit und, über die Fluidgeschwindigkeit, die effektive Geschwindigkeit eines Partikels zu berechnen. Je feiner ein Partikel ist, desto geringer ist dessen Sinkgeschwindigkeit und desto größer ist die Effektivgeschwindigkeit [46].

Visko-turbulente Strömungen im Übergangsbereich

Bei einer Reynolds Zahl zwischen 0,25 und 2000 spricht man von einer visko-turbulenten Strömung. Bei solchen Strömungen ist die Fluidgeschwindigkeit in der Regel höher als bei einer laminaren Strömung. Der Einfluss von Trägheitskräften steigt mit höheren Geschwindigkeiten, da Verwirbelungen hinter den Partikeln entstehen. Diese Verwirbelungen sorgen für eine asymmetrische Druckverteilung. Der Strömungswiderstand durch Reibung in einer visko-turbulenten Strömung wird durch verschiedene

Wissenschaftler durch empirische Gleichungen für unterschiedliche Gültigkeitsbereiche wie folgt beschrieben [46]:

Autor	Gleichung	Gültigkeitsbereich
Kaskas	$c_w = \frac{24}{Re_d} + \frac{4}{\sqrt{Re_d}} + 0,4$	$Re < 2 \cdot 10^5$
Kürten et. Al.	$c_w = \frac{21}{Re_d} + \frac{6}{\sqrt{Re_d}} + 0,28$	$0,1 < Re < 4 \cdot 10^3$
Martin	$c_w = \frac{24}{Re_d} + \frac{5,66}{\sqrt{Re_d}} + 0,33$	$Re < 2 \cdot 10^5$

Tabelle 23: Berechnung der Widerstandsbeiwerte bei visko-turbulenter Strömung [46]

Daraus ergeben sich für die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit folgende Gleichungen:

Autor	Gleichung
Kaskas	$\frac{24 \eta w}{d \rho_f} + \frac{4 w^{\frac{3}{2}} \sqrt{\eta}}{\sqrt{d} \rho_f} + 0,4 w^2 = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right) g d$
Kürten et. Al.	$\frac{21 \eta w}{d \rho_f} + \frac{6 w^{\frac{3}{2}} \sqrt{\eta}}{\sqrt{d} \rho_f} + 0,28 w^2 = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right) g d$
Martin	$\frac{24 \eta w}{d \rho_f} + \frac{5,66 w^{\frac{3}{2}} \sqrt{\eta}}{\sqrt{d} \rho_f} + 0,33 w^2 = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right) g d$

Tabelle 24: Berechnung der Sinkgeschwindigkeit bei visko-turbulenter Strömung [46]

Turbulente Strömungen im Newton'schen Bereich

Bei einer Partikelbewegung in einem Fluid bei einer Reynolds-Zahl ab 2000 spricht man von einer turbulenten Strömung und vom Newton'schen Bereich. In diesem Bereich ist die Widerstandskraft komplett auf Trägheitskräfte hinter einem umströmten Partikel zurückzuführen. Der Widerstandsfaktor ist in diesem Bereich annähernd konstant und wird als wie folgt angenähert [46]:

$$c_w \approx 0,44 \quad (98)$$

Daraus resultiert eine Widerstandskraft von:

$$F_f = 0,17 d^2 \rho_f w^2 \quad (99)$$

Mit einer Auflösung des Kräftegleichgewichts kann folgende Sinkgeschwindigkeit berechnet werden:

$$w = \sqrt{\frac{\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1\right)}{1.02}} \pi d g \quad (100)$$

Beurteilung der Strömungsverhältnisse bei der Aeroklassierung

Dieses Kapitel bietet eine kurze, grobe Einordnung der Strömungsverhältnisse (Reynolds-Zahl, Sinkgeschwindigkeit) für die für diese Arbeit relevanten Partikel (Gesteinsfüller). Gesteinsfüller verfügen über eine maximale Korngröße von 63 µm und bestehen meist aus magmatischen Gesteinen. Die Dichten solcher Gesteine liegen in einem Bereich zwischen 2600 kg/m³ (Rhyolith) und 3300 kg/m³ (Dunit). Als Beispieldichte für die Berechnung der Strömungsverhältnisse wird die Dichte von Gabbro von 2970 kg/m³ verwendet, da für die Versuchsreihen Gabbrosand verwendet worden ist [43]. Das Fluid bei der Aeroklassierung ist Luft. Luft verfügt über eine Dichte von 1,188 kg/m³ und über eine dynamische Viskosität von $18,24 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ bei einer Temperatur von 20 °C und bei einem atmosphärischen Druck von ca. 1 bar bzw. 1013,25 hPa [52].

Unter Einbeziehung dieser Daten ergibt sich folgender Zusammenhang für die Reynolds-Zahl eines umströmten Partikels bei einem Durchmesser in Mikrometern [µm] und einer Sinkgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde [m/s]:

$$\text{Re} = |w| \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \frac{|d| \cdot [10^{-6} \text{m}]}{18,24 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}} 1,118 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,0613 |w| |d| \quad (101)$$

Aus diesem Zusammenhang lassen sich verschiedene Reynolds-Zahlen in Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit und der Korngröße ableiten. Dieser Zusammenhang ist exemplarisch in Abbildung 59 dargestellt:

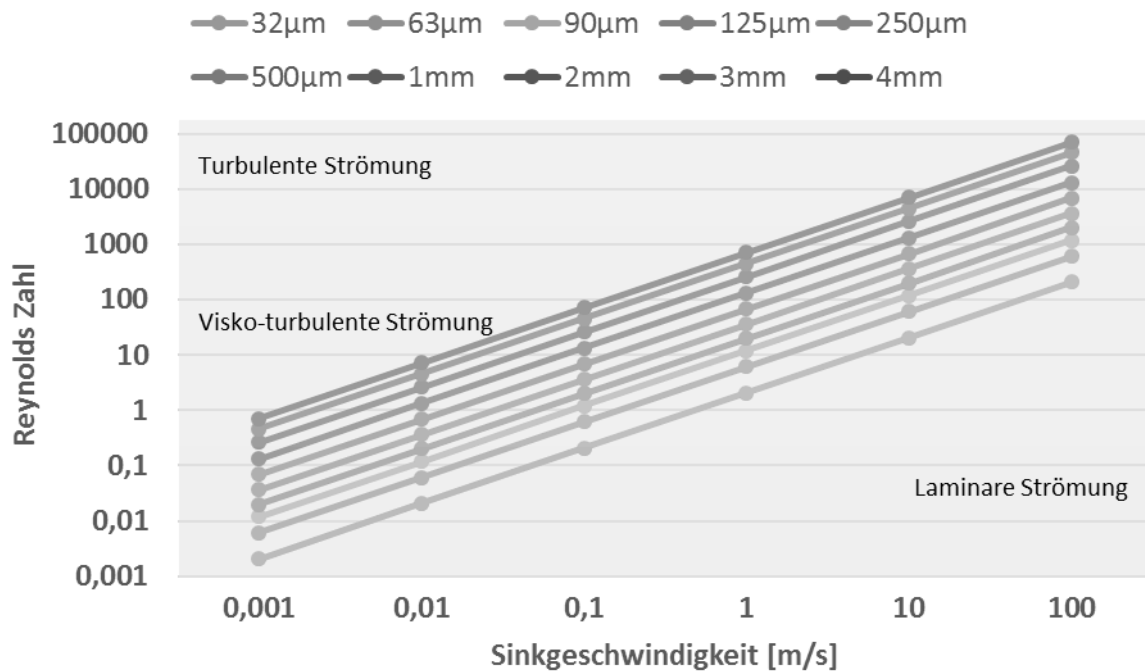


Abbildung 59: Zusammenhang zwischen Reynolds-Zahl, Partikelgröße und Sinkgeschwindigkeit

Aus diesem Zusammenhang ist ersichtlich, dass nur Körnungen mit geringer Korngröße und geringer Sinkgeschwindigkeit in den Bereich der laminaren Umströmung fallen. Nur sehr grobe Körnungen, ab einer Größe von 2 mm, fallen bei hohen Sinkgeschwindigkeiten ab 10 m/s in den Bereich der turbulenten Umströmung. Der Großteil der Partikelbewegungen bei der Aeroklassierung ist folglich dem Bereich der visko-turbulenten Strömung zuzuordnen.

Für die gewünschte Trennkorngröße des zu konzeptionierenden Windsichters von 63 µm fällt die Strömung bei Sinkgeschwindigkeiten bis zu 0,0647 m/s in den laminaren Bereich, danach in den Bereich der visko-turbulenten Umströmung. Für den Stoke'schen Bereich berechnet sich folgende Sinkgeschwindigkeit:

$$w = \frac{(\rho_p - \rho_f)}{18 \eta} g d^2 = \frac{(2970 - 1) \frac{\text{kg}}{\text{m}}}{18 * 18,24 * 10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-1}} 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (63 * 10^{-6} \text{ m})^2 \quad (102)$$

Daraus errechnet sich eine Sinkgeschwindigkeit von 0,35 m/s im Bereich der laminaren Umströmung. Diese Sinkgeschwindigkeit geht allerdings mit einer Reynolds-Zahl von 1,36 einher, welche einer visko-turbulenten Umströmung zuzuordnen ist.

Nach *Kaskas* berechnet sich die Sinkgeschwindigkeit als 0,232 m/s, nach *Kürten et. Al.* berechnet sich die Sinkgeschwindigkeit als 0,212 m/s und nach *Martin* ebenfalls

als 0,232 m/s. Dabei ist allerdings zu beachten, dass sich die Berechnungen nach *Kürten et. Al.* für niedrigere Reynolds-Zahlen eignen. Mit diesen Sinkgeschwindigkeiten berechnet sich eine Reynolds-Zahl von 0,818 bzw. 0,896. Diese Sinkgeschwindigkeiten sind beide der visko-turbulenten Strömung zuzuordnen.

Daraus folgt, dass das Trennkorn mit einer Korngröße von 63 µm und einer Partikeldichte von 2,97 t/m³ eine Sinkgeschwindigkeit zwischen 0,212 und 0,232 m/s aufweist. Die Strömung lässt sich dabei mit einer Reynolds-Zahl zwischen 0,82 und 0,9 als visko-turbulent beschreiben. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Strömungswiderstandsbeiwert bei höheren Reynolds-Zahlen abnimmt, was zu einer Erhöhung der Sinkgeschwindigkeit führt. Dies ist z. B. bei einer Erhöhung der Relativgeschwindigkeit zwischen den Partikeln und dem Fluid der Fall.

Die Material- und Strömungseigenschaften für die Aeroklassierung bei einer Korngröße von 63 µm können insgesamt wie folgt zusammengefasst werden:

Fluiddichte [kg/m³]	Partikeldichte [kg/m³]	Dynamische Viskosität [kg/(m*s)]	Reynoldszahl [-]	Sinkgeschwindigkeit [m/s]
1	2970	$18,24 \cdot 10^{-6}$	0,82-0,9	0,212-0,232

Tabelle 25: Material- und Strömungseigenschaften für die Aeroklassierung von Gabbrofüller

Anhang 8: Quantitative Analyse des Stands der Technik

Um die verschiedenen, zur Entfüllerung geeigneten Anlagen quantitativ miteinander zu vergleichen, ist eine Datenanalyse durchgeführt worden. Hierzu sind über 300 Anlagendaten verschiedener Hersteller und Anlagentypen miteinander verglichen worden. Die betrachteten Klassierer setzen sich aus Siebverfahren (Nass- und Trockensiebung), Windsichtern (Abweiseradsichter, und Kaskadensichter) und Hydroklassierern (Hydrozyklone und Nasswäscher) zusammen. Die Anlagen sind mit einer Trennkorngröße zwischen 50 μm und 100 μm für die Entfüllerung geeignet. Ein Teil dieser Anlagen ist allerdings für andere Einsatzzwecke vorgesehen. Ebenso ist anzumerken, dass nicht für alle Anlagen vollständige Informationen sowohl zu den Dimensionen als auch zum Energieverbrauch vorgelegen haben. Folglich treten kleine Unterschiede bei den Datensätzen auf. Das Ziel dieser Analyse ist es, die Bauhöhen, das Bauvolumen und die Anlagenleistung bzw. den Energieverbrauch in Bezug zum Durchsatz der Anlagen zu setzen. Somit ist ein direkter Vergleich der Anlagentypen möglich. Ebenfalls kann die Neuentwicklung, welche in dieser Arbeit vorgestellt wird, direkt mit dem Stand der Technik verglichen und bewertet werden.

Durchsätze der Klassierer

Die Anlagen werden bei verschiedenen Durchsätzen eingesetzt, die je nach Anlagen, von ca. 0,25 t/h bis zu ca. 1250 t/h reichen. Die Verteilung der Durchsatzraten der verschiedenen Klassierer ist in Abbildung 60 dargestellt. Dabei sind die Durchsätze der verschiedenen Anlagen der jeweiligen Klassierverfahren als Punkte dargestellt:

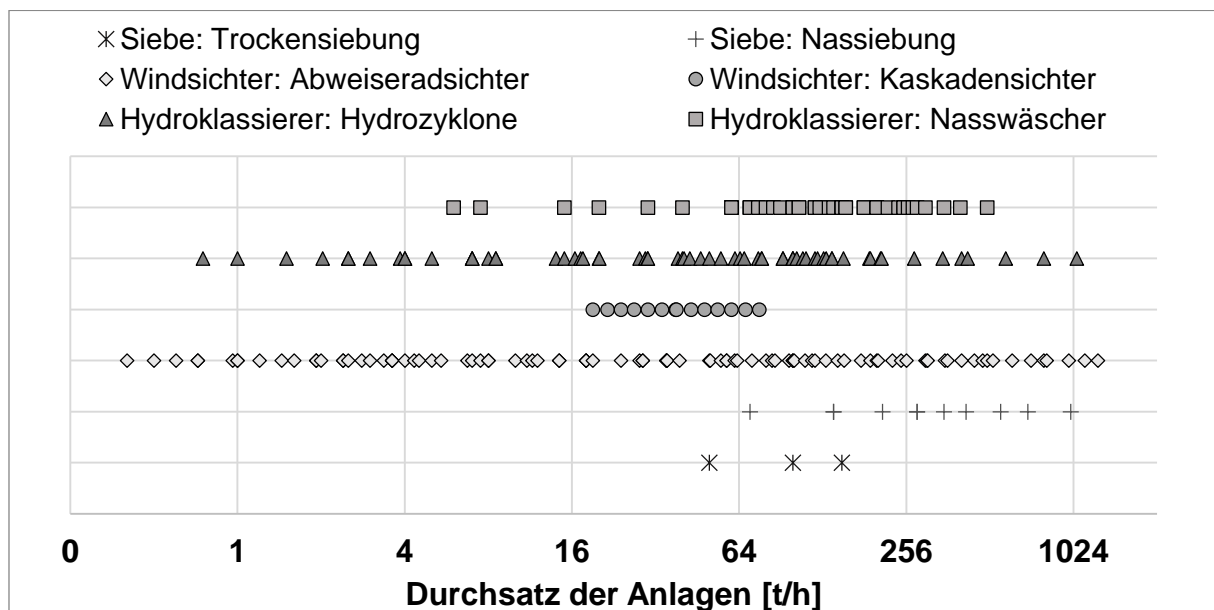


Abbildung 60: Vergleich der Durchsatzraten der verschiedenen Klassierer im Rahmen der Datenanalyse [41]

Anhand dieser Abbildung können die Einsatzgebiete der verschiedenen Klassierer abgeschätzt werden. Hierbei ist anzumerken, dass die Datenanalyse nur eine Stichprobe berücksichtigt. Infolge dessen ist diese Einordnung nur begrenzt repräsentativ. Gemäß dieser Einordnung finden Siebanlagen erst ab einem Durchsatz von 50 t/h eine Anwendung und werden bis zu einem Durchsatz von 1000 t/h eingesetzt. Für höhere Durchsätze ab 150 t/h wird dabei die Nasssiebung eingesetzt. Bei Windsichtern weisen insbesondere Abweiseradsichter ein weites Einsatzspektrum von 0,4 t/h bis 1255 t/h auf. Die Anlagen mit geringen Durchsätzen finden z. B. in der Pharmaindustrie eine Anwendung. Die Anlagen mit hohen Durchsätzen werden z. B. bei der Zementherstellung verwendet. Kaskadensichter, die z. B. zur Entfüllung von Natursteinen eingesetzt werden, weisen bei der Datenanalyse einen Einsatzbereich von 19 t/h bis 75,6 t/h auf. Hydroklassierer, wie Hydrozyklone und Nasswäscher, werden für Durchsätze von wenigen Tonnen pro Stunde bis zu mehreren Hundert Tonnen pro Stunde eingesetzt. Gemäß der Datenerhebung liegt der höchste Durchsatz der Hydroklassierer bei Hydrozyklonen bei 1000 t/h und bei Nasswäschern bei 500 t/h.

Bauhöhe und Bauvolumen der Klassierer

Dieser Abschnitt der Datenanalyse vergleicht den Durchsatz der verschiedenen Anlagentypen mit der Bauhöhe und dem Bauvolumen. Der Vergleich zwischen der Bauhöhe der Anlagen und deren Durchsatz ist in Abbildung 61 dargestellt:

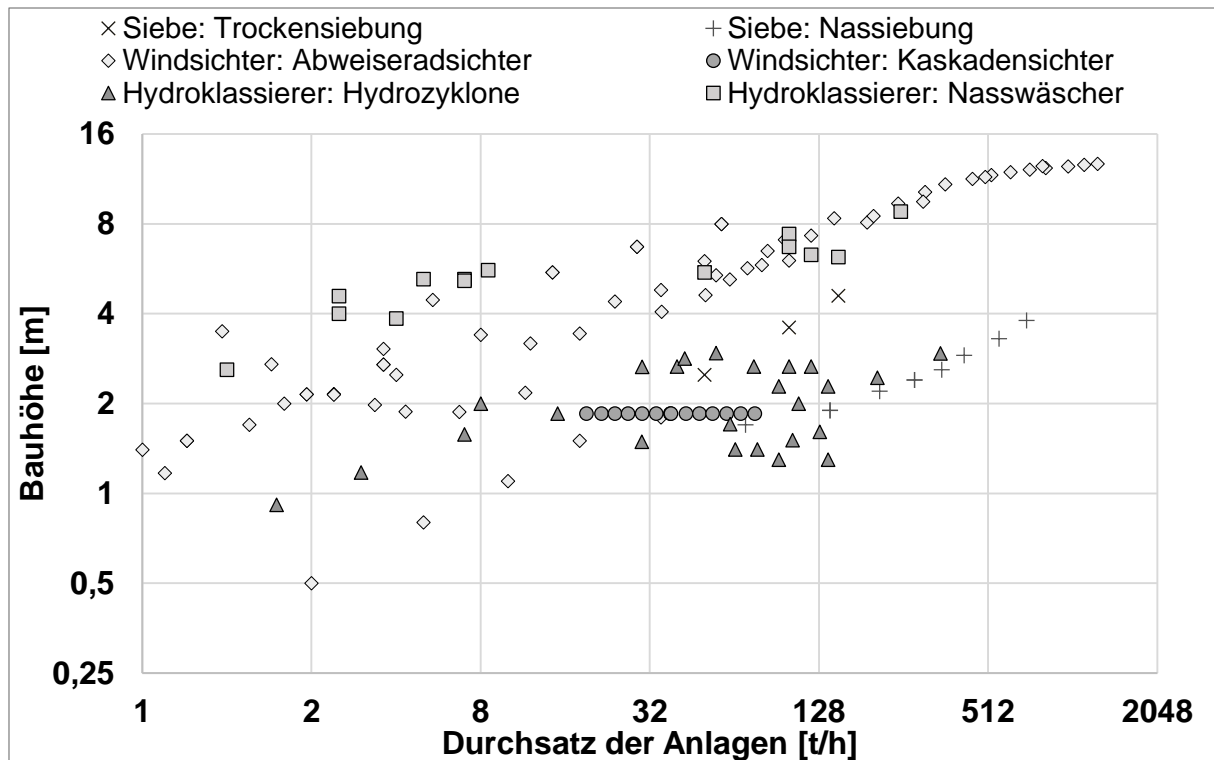


Abbildung 61: Relation zwischen der Bauhöhe und dem Durchsatz verschiedener Klassierer [41]

Hierbei gilt, dass der Quotient zwischen der Bauhöhe und dem Durchsatz im Diagramm von links-oben nach rechts-unten abnimmt. Die Anlagen deren Datenpunkte rechts-unten im Diagramm liegen, weisen die geringste Bauhöhe in Relation zum Durchsatz auf. Dasselbe Prinzip gilt auch für die Relation zum Bauvolumen und zur Anlagenleistung.

Die Bauhöhen der Anlagen reichen von 0,5 m bis zu knapp 13 m. Der Anstieg der Bauhöhe wird bei nahezu allen Klassierern durch eine Potenzfunktion beschrieben. Der Exponent der Funktionen liegt dabei zwischen 0,3 und 0,6. Die größte Bauhöhe im Vergleich zum Durchsatz weisen Nasswäscher und Abweiseradsichter auf. Hydrozyklone und Trockensiebanlagen weisen generell etwas geringere Bauhöhen auf. Die geringsten Bauhöhen in Relation zum Durchsatz weisen Nasssiebe auf. Die Bauhöhe, der bei der Datenanalyse betrachteten Kaskadensichter, liegt unabhängig vom Durchsatz bei 1,6 m. So kann unabhängig vom Durchsatz ein Einsatz z. B. an Bandübergaben gewährleistet werden. Allerdings unterscheidet sich die Fläche und damit das Bauvolumen der Kaskadensichter bei verschiedenen Durchsätzen. Die Relation zwischen dem Bauvolumen und dem Durchsatz der verschiedenen Anlagen ist in Abbildung 62 dargestellt:

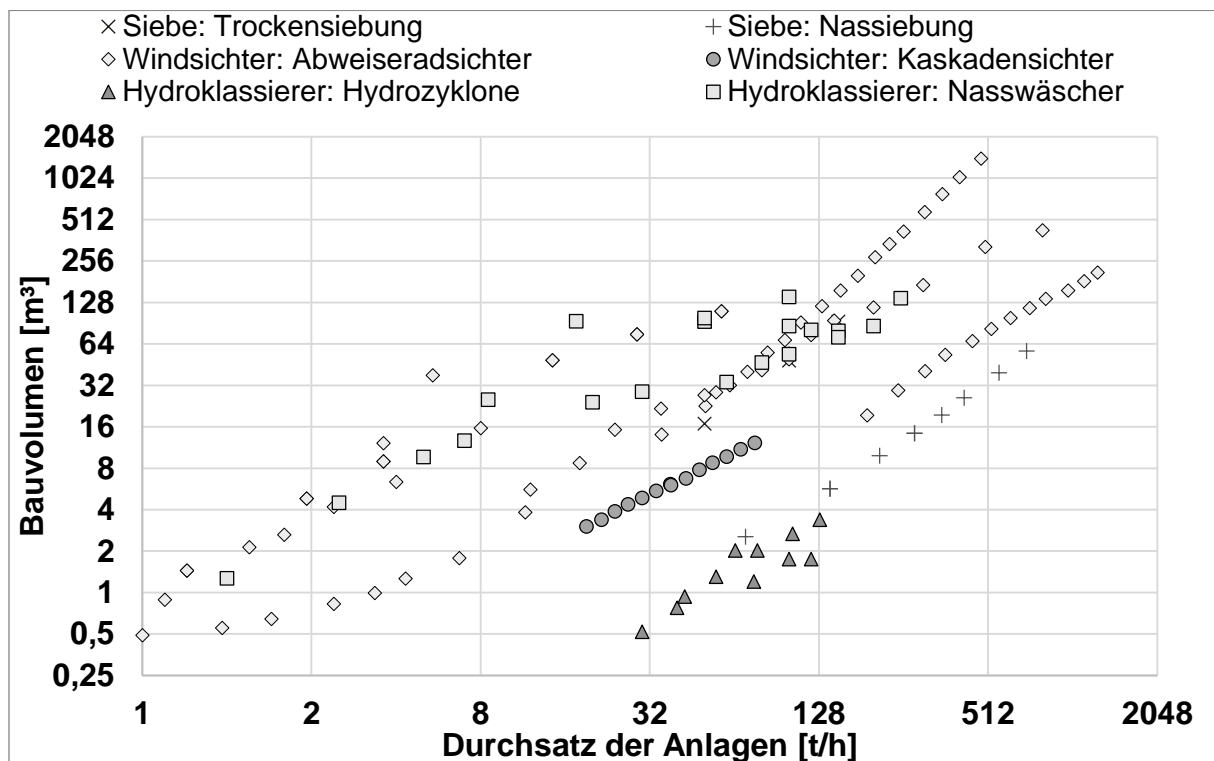


Abbildung 62: Relation zwischen dem Bauvolumen und dem Durchsatz verschiedener Klassierer [41]

Die Bauvolumen der Anlagen reichen von 0,5 m³ bis zu über 1400 m³. Der Zusammenhang zwischen dem Bauvolumen und dem Durchsatz wird ebenfalls durch Potenzfunktionen beschrieben. Hydrozyklone und Nass-Siebanlagen weisen das geringste Bauvolumen in Relation zum Durchsatz auf. Das Bauvolumen von Kaskadensichtern und Abweiseradsichtern mit einem abgewandelten Streuteller ist etwas höher. Das höchste Bauvolumen in Relation zum Durchsatz weisen Nasswäscher und einige Abweiseradsichter, gefolgt von Trocken-Siebanlagen auf.

Energieeffizienz der Klassierer

Neben der Baugröße ist der Energieverbrauch der Anlagen ein wesentliches Bewertungskriterium. Der Energieverbrauch wird im Rahmen der Datenanalyse aus der Leistung der Anlagen abgeleitet. Für Kaskadensichter und einige Nass-Siebanlagen sind nur Daten zur maximalen Leistung der jeweiligen Anlage verfügbar gewesen. Insofern lässt sich bei diesen Anlagen kein direkter Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch und dem Durchsatz herleiten. Für die Hydrozyklone sind keine ausreichenden Leistungsdaten verfügbar gewesen. Diese werden daher in dem Vergleich nicht berücksichtigt. Der Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch dem Durchsatz der verschiedenen Klassierer ist in Abbildung 63 dargestellt:

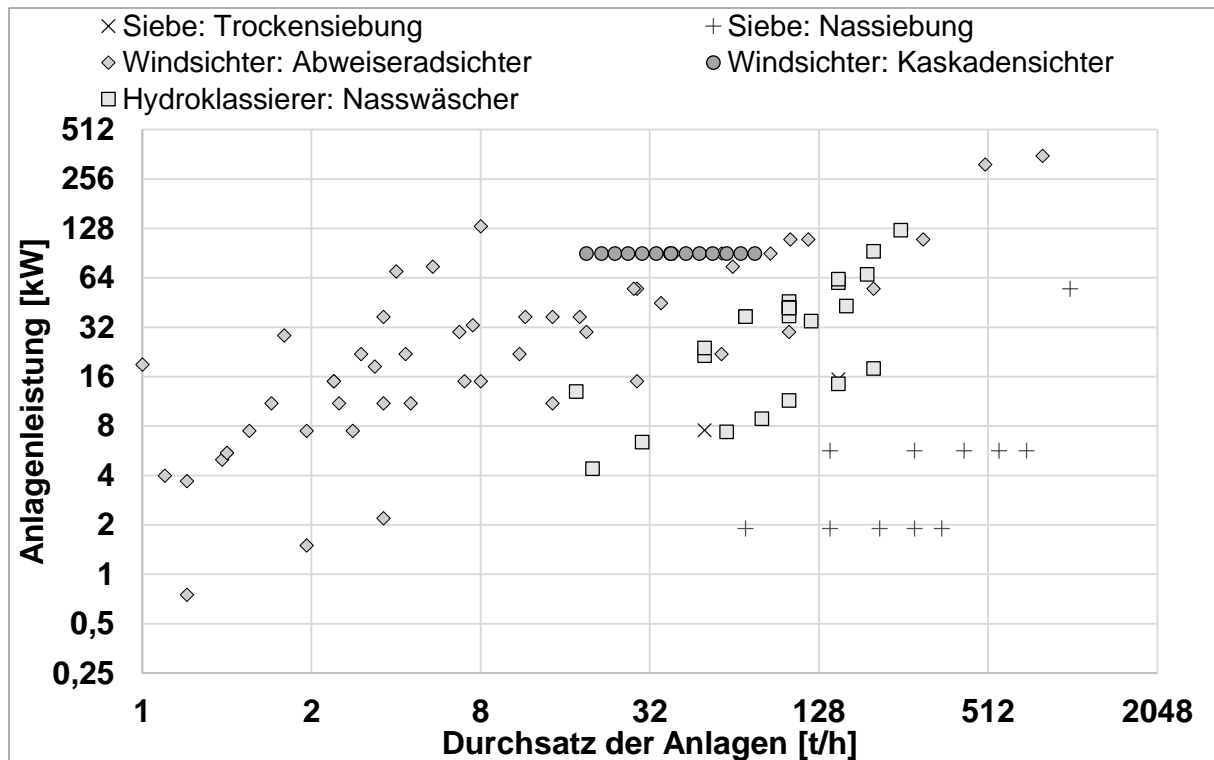


Abbildung 63: Relation zwischen der Anlagenleistung und dem Durchsatz verschiedener Klassierer

Die Anlagenleistungen der verschiedenen Anlagen liegen in einem Bereich von 0,72 kW bis 355 kW. Der Zusammenhang zwischen den Anlagenleistungen und den Durchsätzen der jeweiligen Anlagentypen wird ebenfalls durch Potenzfunktionen mit einem Exponenten kleiner eins beschrieben. Die höchste Energieeffizienz weisen Nass-Siebanlagen auf. Die Energieeffizienz von Trocken-Siebanlagen und Nasswäschern ist etwas geringer. Die geringste Energieeffizienz weisen Windsichter, wie Abweiseradsichter und Kaskadensichter auf.

Anhang 9: Beschreibung der Messgeräte

Im Zuge dieser Arbeit sind verschiedene Parameter im Labor gemessen worden. Zur Messung dieser Parameter werden maßgeblich drei Messgeräte eingesetzt: ein Luftstrahlsieb zur Bestimmung des Füller- und Fehlkornanteils, ein Hitzdraht-Anemometer zur Ermittlung der Strömungsverhältnisse und ein Leistungsmessgerät zur Bestimmung des Energieverbrauchs. Alle Messgeräte sind geeicht und liefern reproduzierbare Ergebnisse. Diese Geräte sind in Abbildung 64 fotografisch dargestellt und werden anschließend beschrieben:

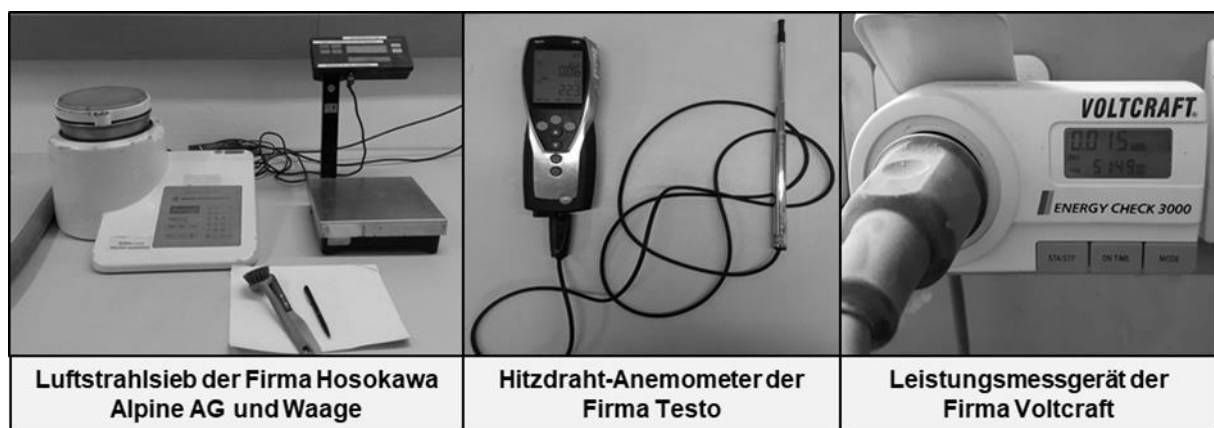


Abbildung 64: Fotografische Abbildung der Messgeräte: Luftstrahlsieb, Hitzdraht-Anemometer und Leistungsmesser

Die Luftstrahlsiebung dient der Bestimmung des Gesteinsfülleranteils und des Fehlkornanteils. Sie zeichnet sich im Vergleich zur herkömmlichen Siebung durch eine höhere Genauigkeit, besonders im Feinkornbereich, aus. Dies schafft die Luftstrahlsiebung durch die Verwendung von zwei Komponenten: einem angeschlossenen Industriestaubsauger und einer im Siebraum rotierenden Schlitzdüse. Der Industriestaubsauger erzeugt ein Vakuum im Siebraum, welches das Feingut durch das Siebgewebe zieht. Die Schlitzdüse sorgt dafür, dass die nachgelieferten Luftmassen beschleunigt werden, bevor sie das Siebgewebe von unten durchströmen und dabei die auf dem Siebgewebe liegenden Körnungen dispergieren. Durch die Dispergierung kann eine schnelle und effektive Trennung gewährleistet werden. Das Feingut wird über den Staubsauger abgezogen und das Grobgut verbleibt auf dem Siebgewebe [53]. Bei den für diese Arbeit notwendigen Laboruntersuchungen werden je Klassiervorgang mehrere 100 g schwere Stichproben untersucht. Diese werden 3 Minuten lang gesiebt. Als Siebgewebe wird ein Sieb mit einer Maschenweite von 63 μm verwendet. Nach dem Siebvorgang wird das auf dem Sieb verweilende Grobgut gewogen und der Fülleranteil

wird aus der Gewichts Differenz zwischen dem Grobgut und der Aufgabemasse errechnet. Das Hitzdraht-Anemometer dient der Bestimmung von Luft- Strömungsgeschwindigkeiten in einem Bereich von 0 bis 20 m/s. Es verfügt über eine Teleskop-Strömungs-sonde, welche über eine gewisse Zeit in die Strömung gehalten wird. In der Sonde befindet sich ein Hitzdraht, welcher durch die Luftströmung abgekühlt wird. Aus dieser Abkühlung errechnet das Messgerät die Strömungsgeschwindigkeit [54]. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Strömungskanal des Klassierers erfolgt an mehreren symmetrisch angeordneten Messpunkten im Kanal, sowohl im Zentrum als auch an den Randbereichen. So kann ein Strömungsprofil ermittelt werden. Die Messdauer je Messpunkt beläuft sich auf mindestens 30 Sekunden. Die Strömungsgeschwindigkeit wird als Mittelwert über diese Dauer getätigten Messungen wiedergegeben. Aus den verschiedenen Messwerten an den jeweiligen Messpunkten und der Querschnittsfläche lässt sich ein Volumenstrom berechnen. Das Leistungsmessgerät dient der Bestimmung des Energieverbrauchs der verschiedenen Komponenten des Klassierers. Das Messgerät wird dabei zwischen dem Stromkabel und der Steckdose bei einer Netzspannung von 230 V installiert und misst dabei die Stromstärke, die von der jeweiligen Komponente benötigt wird. Die elektrische Leistung errechnet sich aus dem Produkt der Spannung und der Stromstärke. Bei den Versuchen wird für die Dispergiereinheit und die Absauge-Einheit je ein Leistungsmessgerät verwendet, sodass beide Stromaufnahmen parallel bestimmt werden können. Als weitere Messgeräte werden die folgenden Geräte eingesetzt:

- Ein Drehzahlmesser zur Bestimmung der Drehzahl der Dispergiereinheit in Abhängigkeit der Einstellungsstufe.
- Eine Waage mit hoher Genauigkeit zur Bestimmung kleiner Massen zur Probenanalyse bei der Luftstrahlsiebung.
- Eine Waage mit geringerer Genauigkeit zur Bestimmung größerer Massen. Diese wird zum Wiegen des Aufgabeguts und des Grobguts verwendet.
- Ein Maßband oder Zollstock zur Bestimmung von Längen.

Anhang 10: Beschreibung des Klassierguts

Für die Versuche sind Gesteinskörnungen aus Gabbro als Klassiergut verwendet worden. Die Dichte des Gesteins ist im Labor als ca. 2970 kg/m^3 und der Schüttgutfaktor als 1,7 ermittelt worden. Die Gesteinskörnungen umfassen ein Kornspektrum von 0 bis 2 mm. Der Gesteinsfülleranteil ist vor jedem Versuch stichprobenartig bestimmt worden. Dieser liegt im Mittel bei 11,8 %. Die statistische Verteilung der Messungen ist in Abbildung 65 dargestellt:

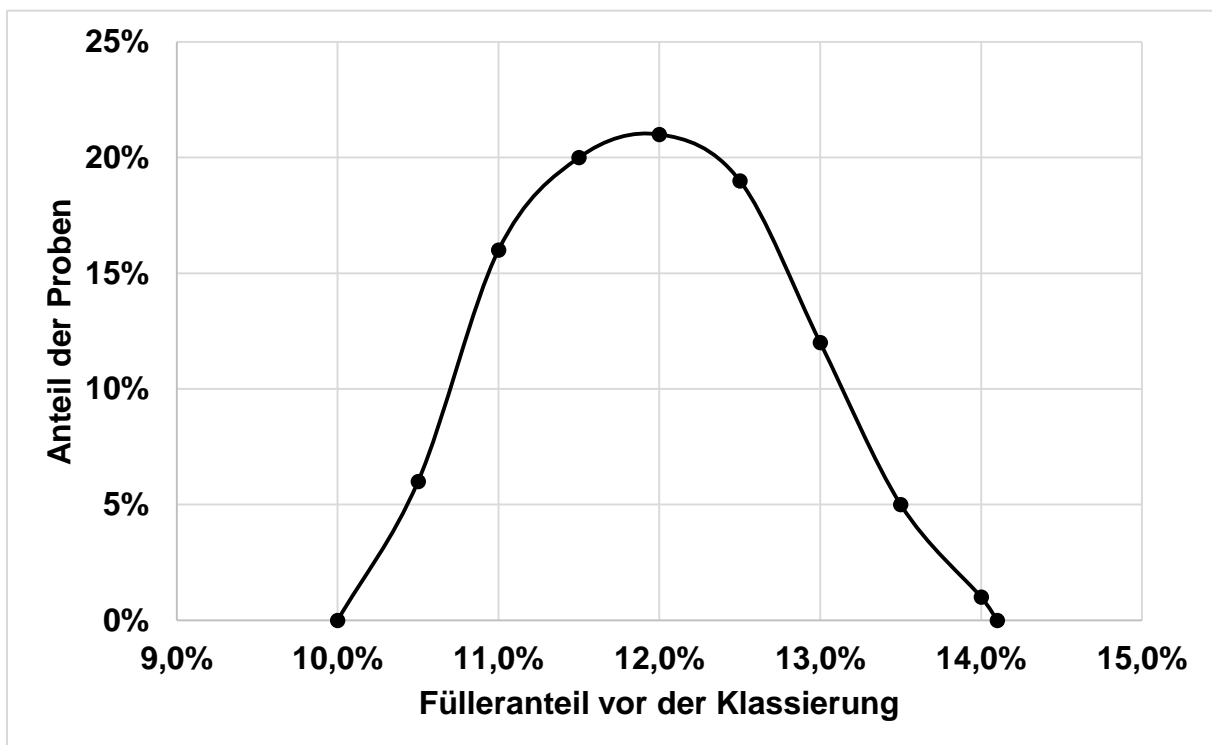


Abbildung 65: Verteilungskurve des Fülleranteils des Klassierguts gemessen an $n = 100$ Proben

Anhang 11: Untersuchungen der Strömungsprofile

Die Strömungsgeschwindigkeit im Strömungskanal ist im Zuge der Messungen der durchschnittlichen Luftströmungsgeschwindigkeit auf ihre räumliche Verteilung, bzw. ihr Strömungsprofil, untersucht worden. So ein Strömungsprofil ist beispielhaft für eine Drehzahl von 13,4 Umdrehungen pro Sekunde in Abbildung 66 dargestellt. Die Rechtecke geben dabei die Bereiche, in denen die 9 Messwerte bestimmt worden sind, an:

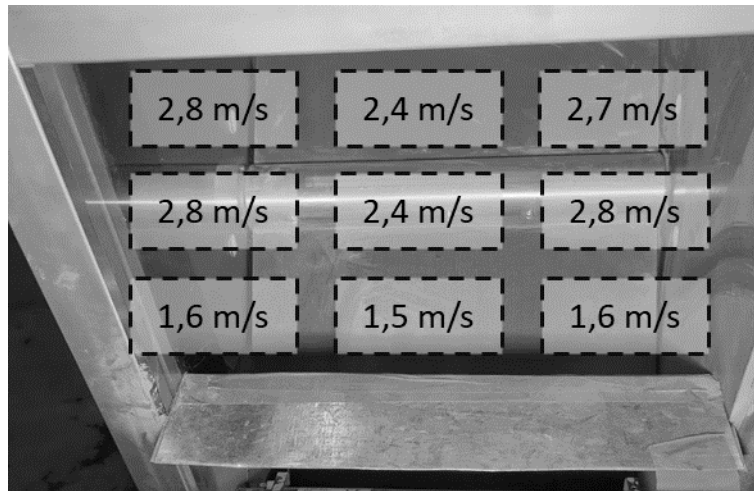


Abbildung 66: Strömungsprofil bei einer Drehzahl von 13,4 Umdrehungen pro Sekunde

Die Luftströmung ist an den Kanten mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von ca. 2,4 m/s höher als im Zentrum. Dort beträgt die Strömungsgeschwindigkeit im Mittel lediglich 2,1 m/s. Dies entspricht einer Differenz von 12,5 %. Die Strömungsgeschwindigkeiten im oberen und mittleren Bereich des Kanals gleichen einander mit ca. 2,6 m/s. Die Geschwindigkeit im unteren Teil des Kanals ist wesentlich, um 42 %, geringer als im mittleren oder oberen Bereich. Die Ergebnisse lassen sich auf die verschiedenen Drehzahlen übertragen. Es sind 8 verschiedene Drehzahlen getestet worden. Die Messwerte bei einer Drehzahleinstellung von 300 korrelieren mit den Profilen bei anderen Drehzahleinstellungen (50-500) mit einem durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten von $R = 0,855$. Die einzelnen Korrelationskoeffizienten liegen zwischen $R = 0,75$ und $R = 0,92$. Die Luftströmung hat die Aufgabe, den Füller in einem Füller-Luft-Gemisch zur Absaugung-Einheit zu befördern. Diese befindet sich im oberen, hinteren Bereich des Kanals. Die Strömung, die durch die Dispergiereinheit erzeugt wird, muss ausschließlich in Richtung der Absaugung gerichtet sein.

Zur Verbesserung der Strömungsprofile ist der Einsatz von Leitblechen getestet worden. Diese sind im unteren Kanalbereich installiert worden und haben die Aufgabe, die Strömung nach oben zu leiten. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 67 dargestellt:



Abbildung 67: Fotografische Abbildung der Leitbleche zur Strömunglenkung

Insgesamt sind drei verschiedene Leitbleche getestet worden:

- Ein Leitblech mit einer Neigung von 15° und einer Länge von 10 cm,
- ein Leitblech mit einer Neigung von 15° und einer Länge von 20 cm und
- ein Leitblech mit einer Neigung von 30° und einer Länge von 20 cm.

Die Tests sind für vier Drehzahleinstellungen (100, 200, 300 und 400) durchgeführt worden. Tabelle 26 zeigt die Strömungsprofile exemplarisch bei einer Drehzahl von 13,4 Umdrehungen pro Sekunde für die 3 verschiedenen Leitbleche und das Strömungsprofil ohne Leitblech:

Strömungs- geschwindigkeit [m/s]	Links, oben	Mittig, oben	Rechst, oben	Links, mittig	Mittig, mittig	Rechts, mittig	Links, unten	Mittig, unten	Rechts, unten	Durchschnitt
Neigung 15° Länge 10 cm	2,15	2,5	2,75	1,05	0,98	0,75	0,62	0,7	0,63	1,35
Neigung 15° Länge 20 cm	3,1	2,1	2,3	1,3	0,9	0,89	0,84	0,95	1	1,49
Neigung 30° Länge 20 cm	2,1	2,45	2,15	1,25	0,95	0,94	0,95	0,85	0,85	1,39
Ohne Leitblech	3	2,4	2,5	3	2,4	2,6	1,4	1,5	1,7	2,28

Tabelle 26: Strömungsverteilung beim Einsatz verschiedener Leitbleche

Die Strömungsgeschwindigkeit im mittleren und unteren Bereich des Strömungskanals konnte durch den Einsatz von Leitblechen so um ca. ein Drittel reduziert werden. Die Strömungsgeschwindigkeit im oberen Bereich hat sich allerdings kaum verändert. So

lässt sich durch den zusätzlichen Strömungswiderstand, die die Leitbleche darstellen, eine Verlangsamung der Strömung feststellen. Dabei liefern drei verschiedene Profile vergleichbare Ergebnisse. Da die Strömungsgeschwindigkeit im Wesentlichen Bereich nicht erhöht wird, eine allgemeine Verlangsamung auftritt und da die Leitbleche einen Widerstand für geworfene Körnungen darstellen, welche sich unter Umständen an den Leitblechen ablagern könnten, wird vom Einsatz dieser abgesehen.

Anhang 12: Untersuchungen zur Partikelzerkleinerung durch Prall

Durch den Aufprall der Schalgleisten auf die Partikel werden diese mechanisch beansprucht. Für die Funktionalität des Klassierverfahrens ist es von Bedeutung, dass es im Zuge dieser Beanspruchung nicht zur Zerkleinerung der Partikel und damit zur Neubildung von Gesteinsfüller kommt.

Um diesen Zerkleinerungsmechanismus für die Laboranlage zu quantifizieren, sind Laboranalysen durchgeführt worden. Diese sehen die Korngrößenanalyse der Gesteinskörnungen vor und nach einem fünffachen Aufprall mit den Schlagleisten bei einer bestimmten Umfangsgeschwindigkeit vor. Die mittleren Korngrößenverteilungen der untersuchten Proben sind in Abbildung 68 dargestellt:

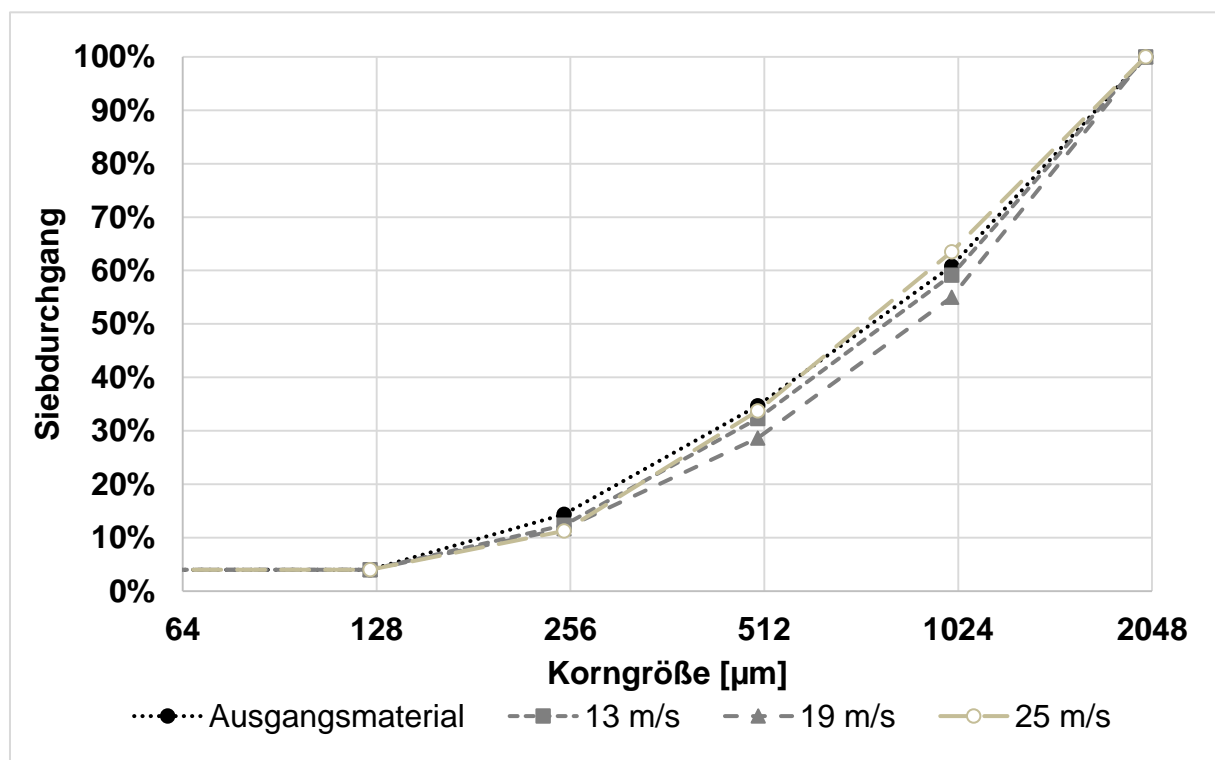


Abbildung 68: Korngrößenverteilungen der Partikelkollektive vor und nach fünffachem Aufprallen mit den Schlagleisten

Insgesamt lässt sich bei den Versuchen keine Zerkleinerung der Partikel aufgrund des Pralls mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit feststellen. Würde eine wesentliche Zerkleinerung auftreten, so wäre ein wesentlicher Unterschied in den Korngrößenverteilungskurven, insbesondere im Feinkornbereich feststellbar. Erwartungsgemäß müsste die Feinheit der Korngefüge mit höheren Umfangsgeschwindigkeiten zunehmen. Dies ist bei den Untersuchungsergebnissen nicht der Fall. Insbesondere im Feinkornbereich liegen die Sieblinien sehr nah beieinander – und im Grobkornbereich sind

relative geringe Unterschiede feststellbar, welche auf statistische Abweichungen der unterschiedlichen, für die Siebung gewählten Teilproben zurückzuführen sind. Insbesondere für die gröberen Fraktionen konnten für die Teilproben des Ausgangsmaterials Massenabweichungen von bis zu maximal 6 % der Gesamtmasse zwischen einzelnen Teilproben festgestellt werden. Auch da diese statistischen Abweichungen die Abweichungen zwischen den Sieblinien der Proben bei verschiedenen Prallgeschwindigkeiten überschreiten, kann keine Zerkleinerung festgestellt werden.

Anhang 13: Messdaten der Klassierversuche

Zusammenfassung der Messdaten: Einfluss der Drehzahl, des Massenstroms und Bestimmung der Gutbeladung : Teil 1					
Massenstrom [t/h]	Fülleranteil nach der Klassierung [%]	Drehzahl der Dispergiereinheit [1/s]	Luftvolumenstrom [m³/s]	Länge des Strömungskanal [m]	Fehlkornanteil [%]
0,057	4,7%	15,61	0,060	1,2	0,1%
0,450	3,9%	13,39	0,058	1,2	0,4%
0,450	4,1%	13,39	0,058	1,2	0,0%
0,968	5,9%	11,16	0,049	1,2	0,1%
0,968	5,4%	12,05	0,053	1,2	0,8%
0,968	4,4%	12,94	0,056	1,2	0,1%
0,968	3,9%	13,39	0,058	1,2	0,0%
0,968	3,8%	13,83	0,060	1,2	0,0%
0,968	4,5%	14,72	0,064	1,2	0,1%
0,968	4,3%	15,61	0,068	1,2	0,1%
1,342	6,1%	11,16	0,049	1,2	0,0%
1,342	4,1%	13,39	0,058	1,2	0,0%
1,342	5,2%	15,61	0,068	1,2	0,1%
1,468	6,5%	11,16	0,049	1,2	0,1%
1,468	5,7%	12,05	0,053	1,2	0,4%
1,468	4,3%	12,94	0,056	1,2	0,5%
1,468	4,4%	13,83	0,060	1,2	0,7%
1,468	4,9%	14,72	0,060	1,2	0,6%
1,468	5,1%	15,61	0,060	1,2	0,9%
1,468	3,8%	13,39	0,058	1,2	0,5%
1,659	4,6%	15,61	0,068	1,2	0,3%
1,715	6,7%	11,16	0,049	1,2	0,3%
1,715	6,3%	12,05	0,053	1,2	0,6%
1,715	4,6%	12,94	0,056	1,2	0,3%
1,715	5,0%	13,83	0,060	1,2	0,1%
1,715	4,9%	14,72	0,064	1,2	0,2%
1,715	5,1%	15,61	0,060	1,2	0,1%
2,089	6,8%	11,16	0,049	1,2	0,0%
2,089	4,2%	13,39	0,058	1,2	1,1%
2,089	5,2%	15,61	0,060	1,2	0,1%
2,089	4,8%	15,61	0,060	1,2	0,1%
2,089	4,7%	15,61	0,060	1,2	0,0%
2,151	4,3%	13,39	0,058	1,2	0,4%
2,189	6,8%	11,16	0,049	1,2	0,0%
2,189	5,8%	12,05	0,053	1,2	0,1%
2,189	4,9%	12,94	0,056	1,2	0,0%
2,189	5,8%	13,83	0,060	1,2	0,1%
2,189	5,4%	14,72	0,060	1,2	0,1%
2,189	5,4%	15,61	0,060	1,2	0,8%
2,400	3,9%	13,39	0,058	1,2	0,2%
2,549	7,0%	11,16	0,049	1,2	0,2%
2,549	6,1%	12,05	0,053	1,2	0,4%
2,549	5,0%	12,94	0,056	1,2	0,3%
2,549	5,7%	13,83	0,060	1,2	0,2%
2,549	5,3%	14,72	0,060	1,2	0,7%
2,549	5,6%	15,61	0,060	1,2	0,1%
2,837	7,5%	11,16	0,049	1,2	0,2%
2,837	6,4%	12,05	0,053	1,2	0,1%
2,837	4,9%	12,94	0,056	1,2	0,1%
2,837	4,6%	13,39	0,058	1,2	0,1%
2,837	5,6%	13,83	0,060	1,2	0,5%
2,837	5,2%	14,72	0,060	1,2	0,5%
2,837	5,2%	15,61	0,060	1,2	0,5%
2,982	4,5%	13,39	0,058	1,2	0,2%
3,262	4,9%	13,39	0,058	1,2	0,2%
3,262	4,6%	15,61	0,068	1,2	0,7%
3,262	6,2%	6,71	0,029	1,2	0,2%
3,262	6,4%	8,94	0,039	1,2	0,1%
3,262	6,3%	11,16	0,049	1,2	0,2%
3,262	4,4%	13,39	0,058	1,2	0,1%
3,262	5,5%	17,84	0,078	1,2	0,1%
3,262	5,8%	20,06	0,087	1,2	0,6%
4,643	5,0%	13,39	0,058	1,2	0,0%
4,643	6,4%	11,16	0,049	1,2	0,1%
4,643	5,8%	12,28	0,053	1,2	0,1%
4,643	5,2%	13,39	0,058	1,2	0,4%
4,643	5,0%	14,50	0,063	1,2	0,3%
4,643	5,1%	15,61	0,068	1,2	0,4%
4,643	5,8%	16,73	0,073	1,2	0,3%
4,864	5,3%	13,39	0,058	1,2	0,5%
4,864	5,7%	13,39	0,058	1,2	0,3%
4,864	5,8%	15,61	0,068	1,2	0,6%

Tabelle 27: Messdaten 1

Zusammenfassung der Messdaten: Einfluss der Drehzahl, des Massenstroms und Bestimmung der Gutbeladung : Teil 2					
Massenstrom [t/h]	Fülleranteil nach der Klassierung [%]	Drehzahl der Dispergiereinheit [1/s]	Luftvolumenstrom [m³/s]	Länge des Strömungskanals [m]	Fehlkornanteil [%]
5,700	7,6%	2,26	0,060	1,2	0,2%
5,700	7,6%	4,49	0,020	1,2	0,4%
5,700	6,9%	6,71	0,029	1,2	0,4%
5,700	7,3%	8,94	0,039	1,2	0,2%
5,700	7,0%	11,16	0,049	1,2	0,2%
5,700	5,3%	13,39	0,058	1,2	0,4%
5,700	5,5%	15,61	0,060	1,2	0,1%
5,700	5,4%	17,84	0,060	1,2	0,8%
5,700	5,5%	20,06	0,060	1,2	0,1%
5,700	5,7%	22,29	0,060	1,2	0,1%
6,304	5,6%	13,39	0,058	1,2	0,0%
6,466	6,3%	13,39	0,058	1,2	0,2%
6,466	5,8%	15,61	0,068	1,2	0,0%
7,200	6,4%	13,39	0,058	1,2	0,0%
8,068	6,7%	13,39	0,058	1,2	1,2%
8,068	7,4%	15,61	0,068	1,2	0,1%
9,000	6,8%	13,39	0,058	1,2	0,0%
9,670	7,6%	13,39	0,058	1,2	0,5%
9,670	7,6%	15,61	0,068	1,2	0,1%
10,500	8,0%	13,39	0,058	1,2	0,1%
11,273	8,4%	13,39	0,058	1,2	0,2%
11,273	8,9%	15,61	0,068	1,2	0,1%
12,000	8,2%	13,39	0,058	1,2	0,1%
13,745	8,6%	13,39	0,058	1,2	0,4%

Tabelle 28: Messdaten 2

Zusammenfassung der Messdaten: Einfluss der Länge des Strömungskanals					
Massenstrom [t/h]	Fülleranteil nach der Klassierung [%]	Drehzahl der Dispergiereinheit [1/s]	Strömung der Absaugeinheit [m³/s]	Länge des Strömungskanals [m]	Fehlkornanteil [%]
1,08	5,2%	13,4	0,06	1,2	0,0%
1,08	5,9%	13,4	0,06	1	0,1%
1,08	6,6%	13,4	0,06	0,8	0,1%
1,08	7,0%	13,4	0,06	0,6	0,2%
1,08	7,6%	13,4	0,06	0,4	1,5%
1,96	6,9%	13,4	0,06	0,4	1,7%
1,96	6,2%	13,4	0,06	0,6	0,4%
1,96	5,8%	13,4	0,06	0,8	0,2%
1,96	5,3%	13,4	0,06	1	0,1%
1,96	4,9%	13,4	0,06	1,2	0,1%
3,26	4,6%	13,4	0,06	1,2	0,1%
3,26	5,0%	13,4	0,06	1	0,1%
3,26	5,3%	13,4	0,06	0,8	1,2%
3,26	6,0%	13,4	0,06	0,6	1,4%
3,26	6,7%	13,4	0,06	0,4	2,0%
5,70	3,8%	13,4	0,06	1,2	0,5%
5,70	4,2%	13,4	0,06	1	0,6%
5,70	4,6%	13,4	0,06	0,8	1,4%
5,70	5,4%	13,4	0,06	0,6	1,8%
5,70	6,0%	13,4	0,06	0,4	2,2%

Tabelle 29: Messdaten 3

Zusammenfassung der Messdaten: Einfluss der Strömung der Absaugeinheit					
Massenstrom [t/h]	Fülleranteil nach der Klassierung [%]	Drehzahl der Dispergiereinheit [1/s]	Strömung der Absaugeinheit [m³/s]	Länge des Strömungskanals [m]	Fehlkoranteil [%]
1,34172	5,2%	13,4	0,0509	1,2	1,3%
1,34172	5,6%	13,4	0,04676	1,2	1,9%
1,34172	6,3%	13,4	0,0428	1,2	0,4%
1,34172	6,6%	13,4	0,03872	1,2	0,8%
1,34172	4,3%	13,4	0,0584	1,2	0,0%
1,34172	4,8%	13,4	0,0548	1,2	0,2%
2,08926	4,8%	13,4	0,0584	1,2	0,0%
2,08926	5,3%	13,4	0,0548	1,2	0,0%
2,08926	5,8%	13,4	0,0509	1,2	0,2%
2,08926	6,5%	13,4	0,04676	1,2	0,1%
2,08926	7,0%	13,4	0,0428	1,2	0,7%
2,08926	7,3%	13,4	0,03872	1,2	0,4%
4,8638	9,5%	13,4	0,0104	1,2	0,0%
4,8638	8,6%	13,4	0,0284	1,2	0,0%
4,8638	7,7%	13,4	0,0374	1,2	0,7%
4,8638	7,0%	13,4	0,0464	1,2	1,6%
4,8638	6,0%	13,4	0,0524	1,2	0,3%
4,8638	4,9%	13,4	0,06	1,2	0,4%
5,7	11,2%	13,4	0,0104	1,2	0,0%
5,7	10,2%	13,4	0,0224	1,2	0,2%
5,7	8,8%	13,4	0,0374	1,2	0,4%
5,7	7,5%	13,4	0,0464	1,2	0,6%
5,7	6,4%	13,4	0,0524	1,2	1,2%
5,7	5,4%	13,4	0,06	1,2	0,8%

Tabelle 30: Messdaten 4

Zusammenfassung der Messdaten: In Reihe geschaltete Tests					
Massenstrom [t/h]	Fülleranteil nach der Klassierung [%]	Drehzahl der Dispergiereinheit [1/s]	Strömung der Absaugeinheit [m³/s]	Länge des Strömungskanals [m]	Fehlkoranteil [%]
Erste Iteration					
3,2616	5,7%	13,4	0,06	5,3%	0,03%
4,8638	6,4%	13,4	0,06	6,0%	0,04%
6,466	6,7%	13,4	0,06	6,3%	0,65%
8,0682	8,0%	13,4	0,06	7,6%	0,20%
9,6704	8,2%	13,4	0,06	7,8%	0,11%
11,2726	9,4%	13,4	0,06	9,0%	0,00%
Zweite Iteration					
3,2616	5,4%	13,4	0,06	4,8%	1,23%
4,8638	5,8%	13,4	0,06	5,2%	0,22%
6,466	6,0%	13,4	0,06	5,4%	0,14%
8,0682	6,6%	13,4	0,06	6,0%	0,00%
9,6704	6,7%	13,4	0,06	6,1%	0,00%
11,2726	6,6%	13,4	0,06	6,0%	0,04%
Dritte Iteration					
3,2616	5,0%	13,4	0,06	4,2%	0,02%
4,8638	4,8%	13,4	0,06	4,0%	0,10%
6,466	5,6%	13,4	0,06	4,8%	1,10%
8,0682	5,8%	13,4	0,06	5,0%	0,30%
9,6704	5,6%	13,4	0,06	4,8%	0,00%
11,2726	5,7%	13,4	0,06	4,9%	0,13%

Tabelle 31: Messdaten 5